

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FÓRMALES
**PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA**



**“Análisis Vibracional de Alta Frecuencia en Máquinas
Rotativas”**

Tesis presentada por:

- Juan Emanuel Carpio Rodríguez
- Luis Eloy Durán Pastor

Para optar el Grado Académico de:

INGENIERO MECÁNICO - ELECTRICISTA

Arequipa – Perú

2016

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| DEDICATORIA | |
| RESUMEN | |
| ABSTRACT | |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Aspectos Generales..... | 1 |
| 1.2. Justificación del tema..... | 2 |
| 1.3. Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.4. Resultados esperados..... | 4 |
| 1.5. Metodología..... | 5 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1. ¿Qué es la vibración?..... | 6 |
| 2.2. Origen de las vibraciones, utilidad y efectos..... | 8 |
| 2.2.1. Fuentes de la Vibración..... | 8 |
| 2.2.2. Causas de Vibración..... | 10 |
| 2.2.3. Efectos de la vibración..... | 12 |
| 2.3. Importancia del análisis de vibraciones..... | 12 |
| 2.4. Fundamentos básicos..... | 15 |
| 2.4.1. Movimiento sinusoidal..... | 15 |
| 2.4.2. Frecuencia..... | 17 |
| 2.4.3. Periodo..... | 18 |
| 2.4.4. Amplitud..... | 19 |
| 2.4.5. Ángulo de fase de la vibración (ϕ):..... | 19 |
| 2.5. Parámetros y unidades de medición..... | 21 |
| 2.5.1. Desplazamiento..... | 21 |
| 2.5.1.1. Desplazamiento absoluto..... | 22 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.5.1.2. | Desplazamiento Relativo | 22 |
| 2.5.2. | Velocidad..... | 22 |
| 2.5.3. | Aceleración..... | 23 |
| 2.6. | Colección de datos y análisis | 28 |
| 2.6.1. | Espectro de Vibración. | 28 |
| 2.6.2. | Armónicos | 30 |
| 2.7. | Rodamientos..... | 30 |
| 2.7.1. | Designación de Rodamientos..... | 31 |
| 2.7.1.1. | Tipos de Rodillos | 32 |
| 2.7.1.2. | Ángulo de Contacto | 34 |
| 2.7.1.3. | Jaula de rodamientos..... | 35 |
| 2.7.2. | Estadísticas de fallas en rodamientos | 36 |
| 2.7.2.1. | Falla por contaminación..... | 38 |
| 2.7.2.2. | Falla por problemas de lubricación | 39 |
| 2.7.2.3. | Falla por montaje incorrecto y otros..... | 40 |
| 2.7.3. | Determinación de la condición de rodamientos mediante análisis espectral..... | 42 |
| 2.7.3.1. | Frecuencias características de fallas en rodamientos. | 43 |
| 2.7.3.2. | Etapas de las fallas en rodamientos | 46 |
| 2.7.3.3. | Técnicas de análisis para detectar fallas en rodamientos..... | 50 |
| 3. | TOMA DE DECISIONES PARA EL ANALISIS | 56 |
| 3.1. | Introducción | 56 |
| 3.2. | Consideraciones para la correcta colección de datos para el análisis. | 57 |
| 3.3. | Determinación de los equipos más importantes | 58 |
| 3.4. | Toma de decisiones respecto a los datos obtenidos..... | 62 |
| 4. | ANÁLISIS VIBRACIONAL EN LOS EQUIPOS DEL TALLER DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA | 65 |
| 4.1. | Introducción | 65 |
| 4.2. | Taladro de Pedestal AG32..... | 67 |
| 4.2.1. | Descripción..... | 67 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.2.1.1. | Selección de Rodamiento | 68 |
| 4.2.2. | Situación Actual del equipo | 69 |
| 4.2.3. | Configuración para la colección de datos | 70 |
| 4.2.4. | Colección de datos. | 73 |
| 4.2.5. | Análisis de los resultados | 75 |
| 4.2.5.1. | Análisis de la Amplitud Global y Tendencia. | 75 |
| 4.2.5.2. | Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos..... | 77 |
| 4.2.6. | Conclusiones previas | 81 |
| 4.3. | Taladro de Pedestal R3110 | 83 |
| 4.3.1. | Descripción..... | 83 |
| 4.3.1.1. | Selección de Rodamiento | 85 |
| 4.3.2. | Situación Actual del equipo | 85 |
| 4.3.3. | Configuración para la colección de datos | 86 |
| 4.3.4. | Colección de datos. | 89 |
| 4.3.5. | Análisis de los resultados | 91 |
| 4.3.5.1. | Análisis de la Amplitud Global y Tendencia. | 91 |
| 4.3.5.2. | Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos..... | 94 |
| 4.3.6. | Conclusiones previas | 98 |
| 4.4. | Taladro de Pedestal R3118 | 99 |
| 4.4.1. | Descripción..... | 99 |
| 4.4.1.1. | Selección de Rodamiento | 101 |
| 4.4.2. | Situación Actual del equipo | 101 |
| 4.4.3. | Configuración para la colección de datos | 102 |
| 4.4.4. | Colección de datos. | 106 |
| 4.4.5. | Análisis de los resultados | 107 |
| 4.4.5.1. | Análisis de la Amplitud Global y Tendencia. | 108 |
| 4.4.5.2. | Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos..... | 110 |
| 4.4.6. | Conclusiones previas | 115 |
| 4.5. | Taladro de Pedestal R3119 | 116 |
| 4.5.1. | Descripción..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.1.1. Selección de Rodamiento | 118 |
| 4.5.2. Situación Actual del equipo | 118 |
| 4.5.3. Configuración para la colección de datos | 119 |
| 4.5.4. Colección de datos. | 122 |
| 4.5.5. Análisis de los resultados | 124 |
| 4.5.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia. | 124 |
| 4.5.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos..... | 126 |
| 4.5.6. Conclusiones previas | 131 |
| 4.6. Brabender | 131 |
| 4.6.1. Descripción..... | 131 |
| 4.6.1.1. Rodamiento del motor..... | 133 |
| 4.6.2. Situación Actual del equipo | 133 |
| 4.6.3. Configuración para la colección de datos..... | 134 |
| 4.6.4. Colección de datos. | 138 |
| 4.6.5. Análisis de los resultados | 138 |
| 4.6.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia. | 139 |
| 4.6.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos..... | 141 |
| 4.6.6. Conclusiones previas | 145 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 146 |
| 6. RECOMENDACIONES | 147 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 148 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1: Movimiento Vibratorio del cojinete de una Máquina..... | 7 |
| Figura 2. 2: Máquina con vibraciones | 9 |
| Figura 2. 3: Fuentes de Vibración de la Máquina..... | 11 |
| Figura 2. 4: Movimiento Sinusoidal | 16 |
| Figura 2. 5: Forma de onda..... | 17 |
| Figura 2. 6: Ángulo de fase de la Vibración | 20 |
| Figura 2. 7: Vibraciones con diferencia de Fase | 21 |
| Figura 2. 8: Desplazamiento, velocidad y aceleración para una vibración armónica | 24 |
| Figura 2. 9: Combinación de Fuentes | 28 |
| Figura 2. 10: Fuerza x Movilidad = Vibración | 29 |
| Figura 2. 11: Constitución de un rodamiento | 31 |
| Figura 2. 12: Punto y Línea de Contacto..... | 33 |
| Figura 2. 13: Tipos de Rodamientos | 34 |
| Figura 2. 14: Angulo de contacto | 35 |
| Figura 2. 15: Jaula en rodamientos..... | 36 |
| Figura 2. 16: Estadística de fallas en rodamientos..... | 38 |
| Figura 2. 17: Problema de contaminación..... | 39 |
| Figura 2. 18: Problema de Lubricación inadecuada | 40 |
| Figura 2. 19: Problema de Lubricación inadecuada | 40 |
| Figura 2. 20: Problema de mal montaje | 41 |
| Figura 2. 21: Problema de impacto por caída | 41 |
| Figura 2. 22: Espectro de un rodamiento defectuoso..... | 42 |
| Figura 2. 23: Esquema de dimensiones de un rodamiento | 45 |
| Figura 2. 24: Primera etapa de falla incipiente..... | 47 |
| Figura 2. 25: Segunda etapa..... | 48 |
| Figura 2. 26: Tercera Etapa | 49 |
| Figura 2. 28: Muestra de análisis de envolvente | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 2. 29: Proceso de demodulación..... | 52 |
| Figura 2. 30: Ondas de Esfuerzo | 53 |
| Figura 2. 31: Datos Peak Vue | 54 |
| Figura 2. 32: Peak vue con filtro | 56 |
| Figura 3. 1: Matriz de Importancia de las máquinas | 59 |
| Figura 4. 1: Vista general Taladro AG 32..... | 67 |
| Figura 4. 2: Puntos de medición del motor de taladro AG 32..... | 71 |
| Figura 4. 3: Ubicación del sensor en el taladro AG32 | 74 |
| Figura 4. 4: Tendencia de valor Global lado acople | 76 |
| Figura 4. 5: Tendencia de valor Global lado libre..... | 77 |
| Figura 4. 6: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople | 78 |
| Figura 4. 7: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople | 79 |
| Figura 4. 8: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople..... | 79 |
| Figura 4. 9: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople | 79 |
| Figura 4. 10: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre..... | 80 |
| Figura 4. 11: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre..... | 80 |
| Figura 4. 12: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre | 81 |
| Figura 4. 13: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre..... | 81 |
| Figura 4. 14: Vista General Taladro R3110..... | 84 |
| Figura 4. 15: Puntos de medición del motor de taladro R 3110 | 87 |
| Figura 4. 16: Ubicación del sensor en el taladro R3110..... | 91 |
| Figura 4. 17: Tendencia de valor Global lado acople | 92 |
| Figura 4. 18: Tendencia de valor Global lado libre..... | 93 |
| Figura 4. 19: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople | 95 |
| Figura 4. 20: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople | 95 |
| Figura 4. 21: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople..... | 96 |
| Figura 4. 22: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople | 96 |
| Figura 4. 23: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre..... | 96 |
| Figura 4. 24: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre..... | 97 |
| Figura 4. 25: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4. 26: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre..... | 98 |
| Figura 4. 27: Vista general Taladro R3118 | 100 |
| Figura 4. 28: Puntos de medición del motor de taladro R3118 | 103 |
| Figura 4. 29: Ubicación del sensor en el taladro R3118..... | 107 |
| Figura 4. 30: Tendencia de valor Global lado acople | 109 |
| Figura 4. 31: Tendencia de valor Global lado libre..... | 110 |
| Figura 4. 32: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople ... | 111 |
| Figura 4. 33: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople ... | 112 |
| Figura 4. 34: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople..... | 112 |
| Figura 4. 35: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople | 113 |
| Figura 4. 36: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople ... | 113 |
| Figura 4. 37: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre..... | 113 |
| Figura 4. 38: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre | 114 |
| Figura 4. 39: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople | 114 |
| Figura 4. 40: Vista general Taladro R3119 | 117 |
| Figura 4. 41: Puntos de medición del motor de taladro R3119 | 120 |
| Figura 4. 42: Ubicación del sensor en el taladro R3119..... | 123 |
| Figura 4. 43: Tendencia de valor Global lado acople | 125 |
| Figura 4. 44: Tendencia de valor Global lado libre..... | 126 |
| Figura 4. 45: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople ... | 127 |
| Figura 4. 46: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople ... | 128 |
| Figura 4. 47: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople..... | 128 |
| Figura 4. 48: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople | 128 |
| Figura 4. 49: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre..... | 129 |
| Figura 4. 50: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre..... | 129 |
| Figura 4. 51: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre | 130 |
| Figura 4. 52: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre..... | 130 |
| Figura 4. 53: Vista general Brabender | 132 |
| Figura 4. 54: Puntos de medición del motor Brabender | 135 |
| Figura 4. 55: Tendencia de valor Global lado acople | 140 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4. 56: Tendencia de valor Global lado libre..... | 141 |
| Figura 4. 57: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople ... | 142 |
| Figura 4. 58: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople | 143 |
| Figura 4. 59: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople..... | 143 |
| Figura 4. 60: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople | 143 |
| Figura 4. 61: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre | 144 |
| Figura 4. 62: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre..... | 144 |
| Figura 4. 63: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre | 145 |
| Figura 4. 64: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre..... | 145 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2. 1: Medidas de vibración | 24 |
| Tabla 2. 2: Medidas de Vibraciones de Máquinas | 25 |
| Tabla 2. 3 Rango de frecuencias | 26 |
| Tabla 2. 4: Medidas para Máquinas | 27 |
| Tabla 2. 5: Descripción de fallas características | 44 |
| Tabla 2. 6: Expresiones matemáticas de frecuencias de falla | 45 |
| Tabla 3. 1: Criterios de evaluación..... | 60 |
| Tabla 3. 2: Análisis de Importancia | 62 |
| Tabla 4. 1: Datos de Placa Taladro AG32..... | 68 |
| Tabla 4. 2: Características Rodamiento 6205..... | 69 |
| Tabla 4. 3: Posición de colección de datos | 71 |
| Tabla 4. 4: Selección de datos para configuración | 72 |
| Tabla 4. 5: Configuración del Equipo de Colección de datos..... | 73 |
| Tabla 4. 6: Características sensor CMSS 2211 | 74 |
| Tabla 4. 7: Constantes de fallas rodamiento 6205..... | 78 |
| Tabla 4. 8: Datos de Placa Taladro R3110 | 84 |
| Tabla 4. 9: Característica rodamiento 6205 | 85 |
| Tabla 4. 10: Posición de colección de datos | 88 |
| Tabla 4. 11: Selección de datos para configuración | 89 |
| Tabla 4. 12: Configuración del Equipo de Colección de datos..... | 89 |
| Tabla 4. 13: Características sensor CMSS 2211 | 90 |
| Tabla 4. 14: Constantes de fallas rodamiento 6205..... | 94 |
| Tabla 4. 15: Datos de Placa Taladro R3118 | 100 |
| Tabla 4. 16: Características Rodamiento 6205 | 101 |
| Tabla 4. 17: Posición de colección de datos | 103 |
| Tabla 4. 18: Selección de datos para configuración | 105 |
| Tabla 4. 19: Configuración del Equipo de Colección de datos..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 4. 20: Características sensor CMSS 2211 | 106 |
| Tabla 4. 21: Constantes de fallas rodamiento 6205..... | 111 |
| Tabla 4. 22: Datos de Placa Taladro R3119 | 117 |
| Tabla 4. 23: Características Rodamiento 6205 | 118 |
| Tabla 4. 24: Posición de colección de datos | 120 |
| Tabla 4. 25: Selección de datos para configuración | 121 |
| Tabla 4. 26: Configuración del Equipo de Colección de datos..... | 122 |
| Tabla 4. 27: Características sensor CMSS 2211 | 123 |
| Tabla 4. 28: Constantes de fallas rodamiento 6205..... | 127 |
| Tabla 4. 29: Datos de Placa motor 10171..... | 133 |
| Tabla 4. 30: Características Rodamiento 6205..... | 133 |
| Tabla 4. 31: Posición de colección de datos | 136 |
| Tabla 4. 32: Selección de datos para configuración | 137 |
| Tabla 4. 33: Configuración del Equipo de Colección de datos..... | 137 |
| Tabla 4. 34: Características sensor CMSS 2211 | 138 |
| Tabla 4. 35: Constantes de fallas rodamiento 6205..... | 142 |

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida y porque sin El nada de esto sería posible, para llegar a ser más para servir mejor.

A mis padres, Yanina y Eloy por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y consejos que con esfuerzo y dedicación puedo conseguir mis metas. Saber que siempre estarán guiándome en mi camino por llegar a ser mejor.

A mis hermanas, Geannina y Fiorella por siempre estar a mi lado en todo momento.

Luis Eloy Duran Pastor

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis padres Lili y Juan por su increíble apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos más difíciles y por darme los recursos para poder estudiar. Ellos me han dado todo lo que soy como persona, valores, principios, perseverancia y coraje para alcanzar mis objetivos.

A mis hermanas Brigitte y Alexandra por contagiarme su buen humor y ganas para continuar por difícil que parecía alcanzar este objetivo.

Gracias también a Blanquita quien a lo largo de todo este tiempo supo apoyarme y darme fuerzas para continuar.

Juan Emanuel Carpio Rodríguez

RESUMEN

En las técnicas aplicadas en el monitoreo de condición para la detección de fallas prematuras en diferentes equipos, el análisis vibracional es sin lugar la técnica más utilizada por su gran capacidad para la detección de fallas. Nosotros nos centraremos en el análisis vibracional en máquinas rotativas específicamente en el análisis de falla en rodamientos basada en el análisis de alta frecuencia, la pregunta que nos hicimos al iniciar este proyecto ¿Será posible una detección temprana de fallas en rodamientos de los equipos seleccionados en el laboratorio de procesos?

Para esto se comenzará con la configuración del equipo MCX 75 (SKF), con el cual se realizará la colección de datos de vibraciones que será periódicamente y con una frecuencia de colección de datos de un mes. Luego, se elegirá los puntos de medición adecuados para una correcta medición y se procederá a la colección de data. Después de tener los datos, se analizará los resultados de vibración de los rodamientos de los motores seleccionados. Finalmente se dará un diagnóstico y recomendación para llegar a una conclusión sobre el estado y condición de los rodamientos de los motores.

Tomaremos en cuenta varios factores para este análisis como son: la condición inicial del motor, tipo de rodamiento utilizado, datos de placa de motor, tabla de severidad de vibraciones SKF, frecuencias de fallas características de rodamientos como son frecuencia de falla en la pista externa, pista interna, elementos rodantes y problemas con canastilla del rodamiento.

Concluyendo, basados en los resultados obtenidos del análisis realizado en los motores del Laboratorio de Procesos, que el estudio y análisis vibraciones es un método práctico y efectivo para detectar fallas en los rodamientos de las máquinas rotativas.

ABSTRACT

In the skills applied in the monitoring of condition for the detection of early flaws in different equipment, the vibratory analysis is the skill most used by its high capacity for the detection of flaws. We will focus on the vibratory analysis in rotary machines especially in the analysis of bearing flaws based on the analysis of high frequency, the question that we made ourselves to initiate this project was: It will be possible to have an early detection of flaws in bearings of the equipment selected in the process laboratory?

For this it will be begun by the configuration of the team MCX 75 (SKF), with this the vibration data collection will be realized periodically and with a frequency of collection of data about one month. Then, the appropriate measurement points will be chosen for a correct measurement and proceed to the collection of data. After having the data, the results of vibration of the bearings of the chosen engines will be analyzed. Finally; a diagnosis and recommendation will be performed for reaching a conclusion about the status and condition of the bearings of engines.

We will take into consideration several factors for this analysis as they are: the initial condition of the engine, type of used bearing, information of badge of engine, table of severity of vibrations SKF, frequencies of typical flaws of bearings as there are a frequency of flaw in the external track, internal track, rolling elements and problems with layette of the bearing.

In conclusion, based on the obtained results of the analysis realized in the engines of the process laboratory, the study and analysis vibrations is a practical and effective method to detect flaws in the bearings of rotary machines.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos Generales

El desarrollo Industrial y el avance de la Ciencia y Tecnología, ha traído como consecuencia que sea necesario un alto nivel de efectividad en los procesos de producción y disponibilidad de sus máquinas, para alcanzar estos niveles se tiene que disminuir los tiempos por paradas no programadas, evitar las reparaciones reactivas, disminuir los costos de producción así como de mantenimiento y una buena calidad en los procesos.

Por mucho tiempo, las empresas industriales realizaban el reemplazo de los componentes, el mantenimiento y/o reparación a sus máquinas después de haber ocurrido la falla. Con el paso del tiempo, la experiencia del personal involucrado en la operación y mantenimiento de máquinas, usó métodos de inspección como visual, auditiva o táctil para determinar el estado de la máquina y/o componente, lo cual tenía que tener bastante experiencia el personal y conocer correctamente la máquina; además, se realizaba un histórico de las fallas ocurridas que mediante métodos estadísticos se realizaba un estudio para determinar los tiempos de cambio de componentes y los tiempos del próximo mantenimiento.

En la industria como en la minería, se ha venido implementado métodos y técnicas como acción a los problemas presentados, con el cual se pueda conseguir un mayor tiempo de vida a los componentes; así como, la detección temprana de fallas. En la actualidad se usa el método de inspección por monitoreo de condición, este monitoreo de condición nos brinda una serie de métodos de análisis que son evaluados y analizados

por personal capacitado para conocer la condición de las máquinas sin necesidad de realizar paradas en la producción y desmontajes de equipos.

En el monitoreo de condición, las diferentes técnicas utilizadas nos sirven para hallar las posibles causas de fallas anticipándose a una parada repentina de las máquinas. La técnica más importante y efectiva del monitoreo de condición es el Análisis de Vibraciones, ya que las señales de vibración mecánicas contienen una gran información acerca del estado y condición del equipo monitoreado.

Al realizar la colección de datos mediante un analizador de vibraciones, se realiza el análisis de los espectros el cual nos ayuda a detectar la falla inicial que corresponde a armónicos de la frecuencia de giro del equipo que se muestran en los espectros como respuesta de una condición anormal del componente medido. Hay que tener en consideración que la magnitud que presentan los armónicos es directamente proporcional con la severidad de la falla.

Toda industria que en sus instalaciones posee de máquinas rotativas, tiene como finalidad que su producción sea constante sin paradas, que sus costos por reemplazo y/o reparación de sus máquinas sean las más bajas y brindar un producto de calidad. Para esto se requiere que todas sus máquinas que intervienen en la producción y las de repuesto, se encuentren en buenas condiciones para que desempeñen su función de manera adecuada y así no altere el objetivo principal de la empresa.

1.2. Justificación del tema

Unos de los principales problemas en la actualidad que existen en las empresas industriales es la disponibilidad y confiabilidad de sus máquinas, estos problemas afectan a los indicadores más aún si son por paradas repentinas debido a las fallas de componentes. Esto ocasiona generalmente tiempos muertos, pérdidas económicas y de producción. Este problema ha estado presente a lo largo de la evolución industrial, es por eso, que se vio necesario aplicar un método en el cual se controla y conoce el estado de los componentes y máquinas y detectar las fallas incipientes que se pueden generar en estas. El método más usado por empresas a la vanguardia de la tecnología, aplican el método de monitoreo por condición.

Por eso surge el interés de este tema de trabajo, que es identificar, analizar y dar un diagnóstico exacto de la condición actual de las máquinas del taller de la facultad de ingeniería mecánica encontrando posibles fallas en sus máquinas rotativas y plantear como caso experimental de estudio en la Universidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Diagnosticar las posibles fallas mecánicas incipientes de los motores eléctricos más importantes existentes en el laboratorio de Procesos de la Universidad Católica de Santa María.

1.3.2. Objetivos específicos

- Configurar el sistema de monitoreo de condición en motores.

- Realizar pruebas experimentales.
- Colectar los datos de las máquinas con el equipo analizador de vibraciones MCX75 (SKF).
- Analizar los espectros de vibraciones identificando los componentes con problemas.
- Detectar fallas incipientes en los motores.
- Encontrar los modos de falla.
- Conocer el estado actual de las máquinas rotativas del taller de Ingeniería Mecánica.
- Proponer una estrategia de monitoreo de condición constante para las máquinas del taller.
- Incentivar el estudio e interés por el monitoreo de condiciones especialmente por el método de Análisis Vibracional.

1.4. Resultados esperados

Los resultados esperados con este trabajo son los siguientes:

- Evaluar el diagnóstico exacto sobre el estado y condición de los motores a analizar.
- Identificar los diferentes tipos de modos de falla más recurrentes en máquinas rotativas.
- Predecir la existencia de fallas en los motores probados.
- Determinar el grado de severidad del estado de la máquina rotativa basado en normas.
- Demostrar que el monitoreo por condiciones es efectivo y muy útil para la detección de problemas en máquinas rotativas.
- Proponer un estudio para la enseñanza de métodos de monitoreo de condición.

- Incentivar el estudio del análisis vibracional en los alumnos de la Universidad, creando un programa para el monitoreo de los motores.
- Lograr una mayor disponibilidad de los equipos de taller de la Universidad.

1.5. Metodología

La metodología que se va a aplicar para el desarrollo de la tesis será como se presenta:

1. **Recopilación de información:** Se recopilará información bibliográfica de documentos que estén relacionados con el Análisis de Vibraciones en máquinas rotativas, modos de fallas mecánicas, métodos de colección de datos de vibraciones mecánicas, diagnósticos de fallas, normativas que validen las fallas, etc. Con el propósito de adquirir conocimientos que son necesarios para el desarrollo del trabajo.
2. **Estudio de equipos:** Conocer en su totalidad el equipo analizador de vibraciones para realizar una buena colección de datos, análisis y estudio de los datos obtenidos. También será necesario conocer de una los motores a analizar para lograr tener un diagnóstico real sobre los problemas que se pudieran presentar.
3. **Demostración de Evidencia:** A través de estudios realizados anteriormente se obtendrá información y evidencia que será básica, complementaria y fundamental para plantear las hipótesis correctas antes de realizar los estudios propuestos, seguidamente se utilizara

esta información para realizar una comparación con los datos obtenidos y poder establecer las conclusiones.

4. Configuración y Colección de Data: A través del estudio del manual y la experiencia obtenida a lo largo de este año, se lograra configurar el equipo de vibraciones correctamente, estableciendo los niveles de frecuencias correctas para de esta forma y con el fin de tener confiabilidad en nuestros datos tomados para realizar un estudio correcto y un diagnóstico certero.
5. Análisis Experimental de Datos: Con los datos colectados correctamente se procederá a analizar dichos datos utilizando el software Analysis and Reporting Module (ARM). Se utilizará diferentes técnicas de análisis e interpretación con la ayuda de las tablas de Charlotte y los casos que fueron analizados en la demostración de Evidencia.
6. Consolidación y conclusiones: Finalmente se consolidara toda la información obtenida y se obtendrá las conclusiones acerca de los problemas que presentan los motores estudiados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ¿Qué es la vibración?

La vibración es el movimiento oscilatorio y repetitivo de una máquina o estructura, alrededor de su posición original o reposo. No es perceptible visualmente, pero a si lo es al tocar y a veces puede oírse. Muchas veces estas vibraciones en máquinas pueden ser periódicas.

Las máquinas a medida que reaccionan, las fuerzas internas o externas generan el movimiento. Las fuerzas internas, son las que son producidas en la máquina como desbalanceo, desalineación, eje doblado, rodamiento en mal estado, entre otros. Las fuerzas externas, son de lo que lo rodean a la máquina como el suelo, estructura, la tubería, el aire, entre otros.

La forma más sencilla de explicar una vibración mecánica y su medición mediante un transductor de vibraciones se muestra en la Figura 2.1. El transductor está rígidamente unido a la superficie del cojinete; por lo tanto, el transductor se mueve de la misma forma del cojinete y mide el movimiento de este. Si la superficie del cojinete se desplaza o vibra hacia arriba y hacia abajo, significa que ella o su unión a la base es elástica (para poder permitir estos movimientos). Esta elasticidad se representa gráficamente con un resorte como se muestra en la Figura 2.1.

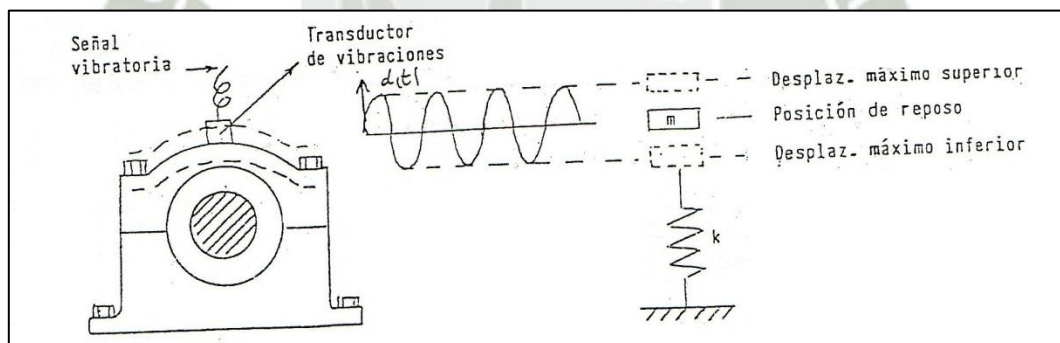


Figura 2. 1: Movimiento Vibratorio del cojinete de una Máquina

Fuente: [Análisis Vibracional Avanzado, Universidad de Concepción, 2010]

Para la vibración, el termino desplazamiento se utiliza para describir la distancia recorrida por un objeto en movimiento. Desplazamiento es el cambio en la distancia o la posición del objeto con respecto a un punto de referencia. La magnitud del desplazamiento se le conoce amplitud. Existen otras consideraciones que se deben tener en cuenta y son los siguientes:

- Una estructura vibrará solo si una fuerza es aplicada.
- Una vez que se quita la fuerza, la vibración se disipará por fricción llegando a cero en la posición neutral.
- La amplitud de la vibración o magnitud es proporcional a la cantidad de fuerza aplicada a más fuerza, mayor vibración.
- Ninguna máquina puede ser representada con precisión mediante un simple sistema de masa resorte. Una máquina se compone de muchos sistemas de masa resorte, cada uno en interacción con el otro. Sin embargo, los principios básicos de un sistema masa resorte todavía se aplican.

2.2. Origen de las vibraciones, utilidad y efectos.

2.2.1. Fuentes de la Vibración

Las fuentes de vibración respecto a la función que desempeñan las máquinas, en cuanto a las vibraciones viene a estar dadas por dos causas que son por los movimientos y las fuerzas.

- Por la función: Todos los componentes de una máquina rotativa cumplen una función determinada lo cual generan vibraciones. En la Figura 2.2 las manivelas deslizantes, máquinas y las cadenas con los sprokets son claros ejemplos de dispositivos

que generan vibraciones por imposición de movimientos. Sin embargo, es el torque, es decir la fuerza aplicada a una distancia la que ocasiona dichos movimientos. Por ello, toda vibración es causada esencialmente por fuerzas que se generan al interior de la máquina o por fuerzas externas aplicadas sobre la máquina lo cual esta sería una fuente de vibración por la función que desempeña la máquina.

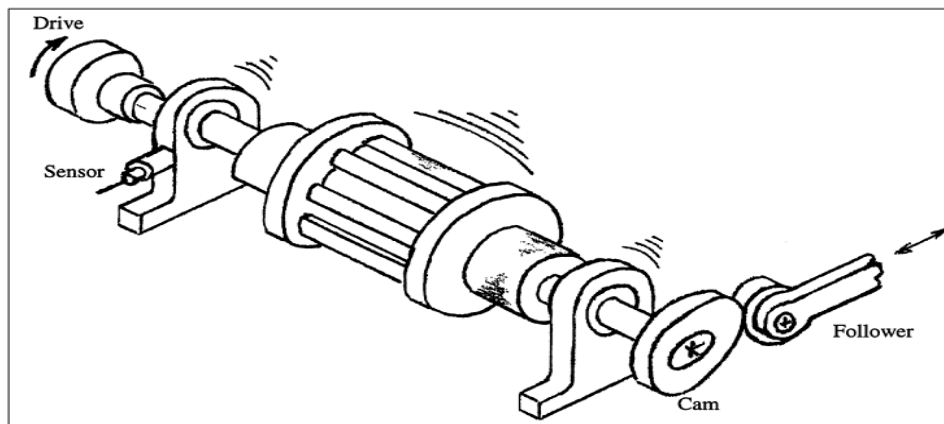


Figura 2. 2: Máquina con vibraciones

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

- Por el diseño de la máquina: Es otro de los puntos que tiene responsabilidad en la excesiva vibración; ya que, la máquina al ser forzada causa pulsaciones innecesarias o fuerzas vibratorias. Por ejemplo, el estator flexado de un motor da como resultado fuerzas electromagnéticas, que causan vibraciones innecesarias.

- Por mala fabricación: La incorrecta fabricación en los componentes de las máquinas o mal ensamble de estos componentes, puede traer consigo de que cuando funcione la máquina presente vibraciones altas.
- Por mala instalación: Al realizar una instalación defectuosa las máquinas; como por ejemplo, al realizar alineamientos o resolver los problemas por pata coja, cuando no están realizados de la mejor manera van a generar vibraciones.
- Por el desgaste: El desgaste de los componentes como los rodamientos van a generar vibraciones en las máquinas.
- Mantenimiento: El inadecuado mantenimiento o falta de mantenimiento, por ejemplo al no lubricar de manera adecuada los rodamientos de la máquina estos generaran ruido y vibración.

2.2.2. Causas de Vibración

Las vibraciones pueden se causadas por las siguientes fuerzas vibratorias:

- Mala calidad de la máquina: Una deficiente fabricación en los componentes de las máquinas como puede ser materiales, calidad, uso de componentes inadecuados, rotor no centrado, el desbalance, entre otros.
- Errores de montaje: Una de las principales causas de las vibraciones en las máquinas es por errores al momento del montaje. Que pueden ser debido al mal alineamiento, soltura, pata coja, distorsión, entre otros.

- Defectos estructurales y de materiales: El desgaste normal, daño estructural y abusos que pueden modificar la función de la máquina y pueden causar vibraciones.
- Lubricación: Los engranajes y rodamientos desarrollan defectos metálicos localizados después de años de carga y descarga, también como resultado de la presencia de materiales extraños y la lubricación deficiente. La mala lubricación generara un gran ruido y desgaste acelerado de los rodamientos. Tales defectos causan vibraciones impulsivas que indican deficiencia del rodamiento.
- Desbalance: El desbalance del motor ocasiona vibraciones altas y es considerable en el desempeño del motor.

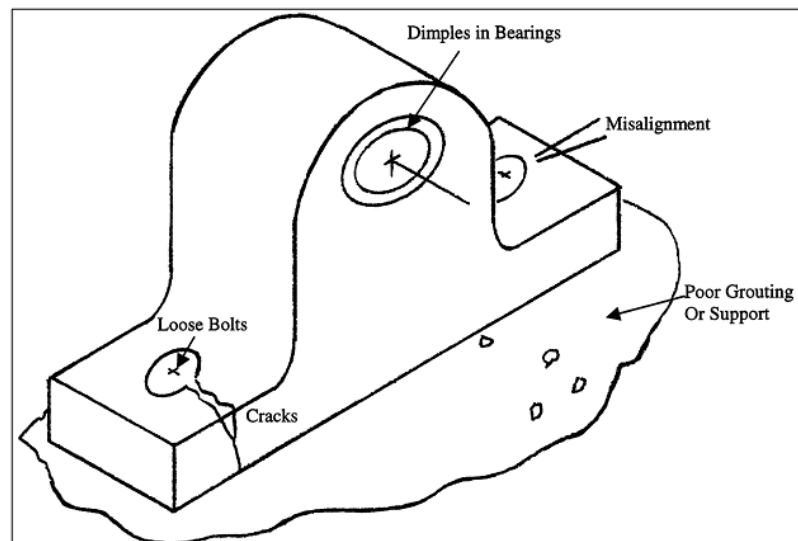


Figura 2. 3: Fuentes de Vibración de la Máquina

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

2.2.3. Efectos de la vibración

El resultado de las excesivas vibraciones es el rozamiento, que pueden dañar los sellos y causar una falla incipiente en los rodamientos. Las partes más débiles de una máquina son sus tuberías, ductos o la estructura de soporte que fallaran como resultado de la excesiva vibración. Los efectos de las vibraciones son los siguientes:

- Falla por fatiga: La fatiga se da a altas frecuencias; es decir, un gran número de ciclos en el tiempo. Cuando las fuerzas son suficientemente grandes, la falla puede ocurrir como resultado de la fatiga de baja frecuencia.
- Pérdida de la calidad del proceso: Los procesos tales como el de las imprentas, el maquinado y revestimiento de los papeles puede ser afectados por la excesiva vibración, por lo que su producto final no será un producto de calidad.
- Molestias al personal: Las vibraciones pueden afectar al ser humano; ya que, el ser humano puede tolerar una exposición limitada de ruido y vibración. En la mayoría de ejemplos la estructura falla antes de que el cuerpo humano se adversamente afectado. El oído es un caso especial.

2.3. Importancia del análisis de vibraciones

En la actualidad, los avances tecnológicos han evolucionado de tal manera que es de mucha utilidad para diversas aplicaciones que se usa en la industria. En la que grandes aportaciones matemáticas y métodos de análisis se consolidaron para resolver alguno de los problemas de la vibración mecánica detectando de donde proviene la vibración.

Las importantes aportaciones matemáticas ampliaron considerablemente en el área de investigación de las vibraciones mecánicas ; como por ejemplo, los métodos de Rayleigh que sirven para determinar las frecuencias naturales o frecuencias de resonancia de algunas máquinas, en las que se basaba en las ecuaciones de energía, las variables de estado permiten resolver y analizar los problemas de ecuaciones diferenciales no lineales, el elemento finito que consiste en discretizar un elemento para después modelarlo y analizar luego el comportamiento de este, así se puede ver los modos de como vibra la máquina, estadísticas que ayudaron el estudio de las vibraciones aleatorias.

Los métodos modernos complementados con los avances tecnológicos han permitido que se puedan tener analizadores de vibración y también poder ver los espectros en la computadora para un mejor análisis. Esto hace de las vibraciones un campo amplio para la investigación de diversos modos de fallas de las máquinas rotativas.

Para comprender la importancia en la actualidad del estudio de las vibraciones mecánicas, basta con conocer algunos de sus causa – efecto. Las personas que están inmersas en esto siempre están relacionados con las vibraciones como por ejemplo: El buen funcionamiento de los amortiguadores de los automóviles que permite un mejor manejo del piloto y confort en las personas, en la industria la falla de una máquina por el deterioro de un rodamiento causa pérdidas económicas y de tiempo, el ruido causado por las máquinas debido a las vibraciones mecánicas afecta física y psicológicamente a las personas.

Para tener un mayor conocimiento de la importancia de las vibraciones mecánicas, se hablara de las causas - efectos en cuanto a la industria. En

toda empresa industrial se tienen diversos tipos de máquinas rotativas que pueden ser los causantes de las vibraciones, alguno de los ejemplos causados por la vibración se han comentado en el punto 2.3.4 Causas de vibración. Para las industrias que usan las máquinas rotativas la importancia del monitoreo de condición es por lo siguiente:

- Evitar pérdidas económicas.
- Paradas de planta.
- Tener los repuestos en almacén.
- Contaminación por ruido.
- Accidentes laborales.
- Investigación para tener varios modos de falla.

Una de las formas para realizar un monitoreo de condición, para conocer el buen funcionamiento y vida útil de la máquina, es por el método de análisis de vibración, este consiste en coleccionar datos de las vibraciones de las máquinas por medio de un equipo analizador de vibraciones y mediante los espectros mostrados con la experiencia del personal, determinar la vida útil de la máquina o de sus elementos y su estado actual de cada uno de ellos. Para esto, se va a llevar un historial de la medición de las vibraciones con el fin de predecir fallas futuras y tomar acción antes que ocurra la falla.

Una de la importancia por cual se estudia el análisis vibracional y todo ingeniero mecánico deben conocer y tomar en cuenta es la resonancia, este fenómeno es de gran interés en el estudio de las vibraciones mecánicas, porque ha estado relacionado en grandes eventos destructivos en la historia de la industria y de las estructuras. La resonancia se manifiesta con amplias magnitudes de vibración.

La pregunta que se hace es: ¿Por qué estudiar las vibraciones mecánicas? La respuesta puede variar depende de su impacto que puede ser económico y físico. Si hablamos sobre el impacto económico es lo que más preocupa a las industrias, ya que, un problema de vibración puede traer como consecuencia una falla a la máquina e incluso daños a las personas. Lo cual esto generaría grandes pérdidas económicas. En cuanto al impacto físico a personas puede manifestar de diferentes maneras, por ejemplo, cuando un obrero es sometido a constantes fuentes de vibración le afecta algunas partes del cuerpo; ya que, son más susceptibles a diferentes frecuencias de vibración. Las vibraciones generan en el mayor de los casos ruidos mayores a los permitidos en rangos no deseables.

2.4. Fundamentos básicos

Las vibraciones tradicionalmente han sido asociadas a las fallas de más máquinas, tales como; desgaste, mal funcionamiento, ruido y daños estructurales. En los últimos años las vibraciones se relacionan al ahorro de millones de dólares que se puede lograr por paradas de planta. El control de los cambios de niveles de la vibración en las máquinas ha llegado a formar una parte importante el monitoreo de condición de las máquinas. Se explicará en esta parte de la tesis los fundamentos de las vibraciones, unidades, terminologías entre otras.

2.4.1. Movimiento sinusoidal

En el movimiento sinusoidal puro, la amplitud pico por encima de la posición neutral, es igual a la amplitud pico negativa por debajo de la línea neutral. En la Figura 2.4, se puede observar el desplazamiento máximo o valor pico y el desplazamiento pico a pico. En la vibración, la distancia recorrida por un eje o componente dentro del juego de

rodamientos es importante. Por lo tanto, las amplitudes de desplazamiento son siempre considerados como un valor pico a pico.

Partiendo de la posición neutral, la amplitud es cero como se muestra en la Figura 2.4. Cuando la onda sinusoidal ha pasado por sus picos negativos y positivos regresando a la posición neutral, es decir al nivel cero de la amplitud, con esto se completaron el ciclo.

Si la vibración es producida por ejemplo por desbalance del eje, el eje de la maquina completara una revolución sobre un ciclo, es decir dará una vuelta completa. Es importante entender el vínculo entre los ciclos y rotación del eje a lo que se refiere a una frecuencia y en definitiva fase.

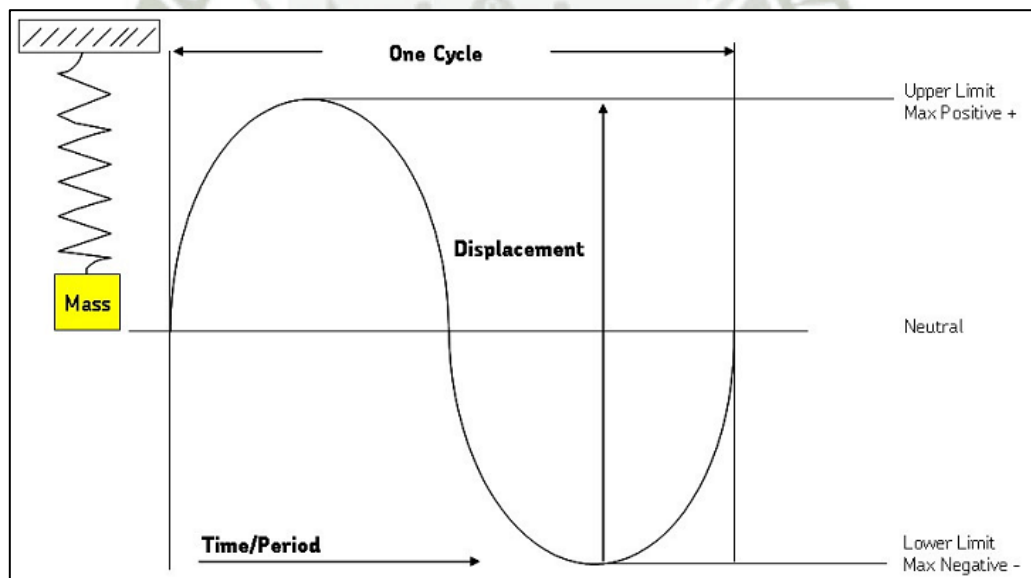


Figura 2. 4: Movimiento Sinusoidal

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

El tiempo necesario para completar un ciclo completo es el periodo. El periodo es importante en la búsqueda de eventos, como un elemento rodante impactado en un defecto de una pista de rodamiento. Si el tiempo entre una serie de eventos es conocido, el analista buscará un patrón en la señal de vibración con ese periodo en particular.

Las características principales de un movimiento vibratorio que una onda sinusoidal son; frecuencia, amplitud y fase. Como se muestra en la Figura 2.5.

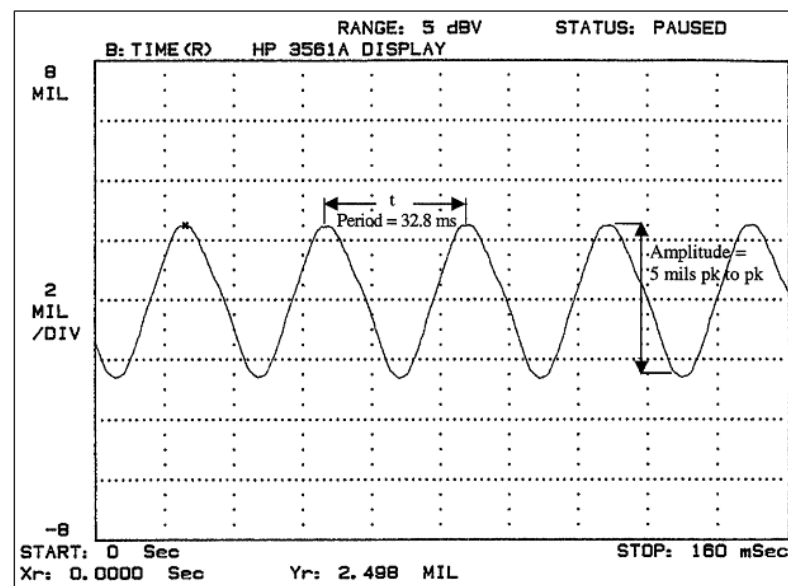


Figura 2. 5: Forma de onda

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

2.4.2. Frecuencia

Es el número de ciclos o eventos en una unidad de tiempo, es expresado como ciclos por segundos (Hertz o Hz), ciclos por minuto (CPM) u órdenes de la velocidad de operación. La velocidad de operación de una máquina y las velocidades críticas están expresadas en revoluciones por minuto (RPM).

Fórmula 2.1: Ecuación de Frecuencia

$$F = \frac{1}{T}$$

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

Dónde:

F: es la frecuencia

T: es el periodo de tiempo para un ciclo.

2.4.3. Periodo

Es la inversa de la frecuencia y está definida como el tiempo requerido para completar un ciclo de vibración. Las unidades del periodo son segundos por ciclo.

De la Figura 2.4 que se obtuvo de un analizador se puede ver.

- El periodo es obtenido contando las cuadrículas de la escala.
- El rango total de visualización es de 160 milisegundos (mseg).
- Cada división mayor es de 160 mseg/10 o 1.6 mseg.
- El periodo puede calcularse con una exactitud de 0.8 mseg.
- Hay 20.5 divisiones menores en un periodo; es decir, se repite del valor pico.

2.4.4. Amplitud

Es el máximo valor de la vibración en una determinada posición de la máquina y tiempo. Cuando la vibración es visualizada como desplazamiento y medido en mils (1 mil = 1/ 1000 pulg), la amplitud medida es pico a pico.

2.4.5. Ángulo de fase de la vibración (ϕ):

Es la relación en tiempo, medido en grado entre dos vibraciones de la misma frecuencia como muestra la Figura 2.6. Se aprecia que el pico de vibración medido en el punto “B” ocurre en tiempo antes que el pico de vibración medido en “A”. El tiempo es medido de izquierda a derecha. La vibración del punto B está adelantado a la vibración del punto “A”.

El ángulo de fase es utilizado para determinar la relación en tiempo entre una excitación (fuerza) y la vibración causada; por ejemplo, la fuerza debido a una masa desbalanceada y la vibración causada. Este ángulo es usado para realizar el balance de las máquinas.

El ángulo de fase también es usado para determinar las relaciones de causa y efecto. La causa ocurre primero. En la Figura 2.6 un ciclo de vibración es de 360° por lo tanto B se adelanta en más o menos un cuarto de ciclo de 90° .

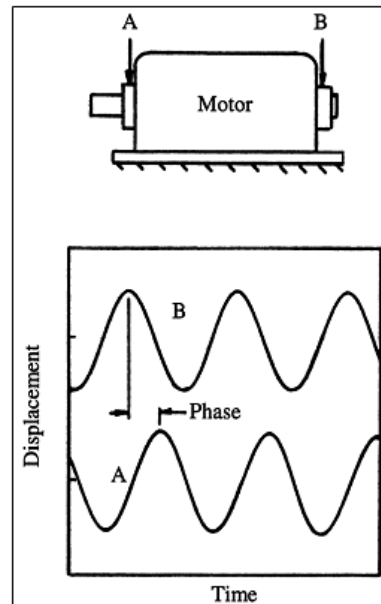


Figura 2. 6: Ángulo de fase de la Vibración

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

Se muestra en la Figura 2.7-a que se tiene dos vibraciones que no llegarán a sus posiciones extremas al mismo tiempo, ya que una de ellas estará retrasada, se nota que las dos tienen la misma frecuencia.

En la Figura 2.7-b muestra una máquina cuyos descansos 1 y 2 se están moviendo en fase. Esto significa que la máquina se está moviendo paralelamente hacia arriba y hacia abajo.

En la Figura 2.7-c. Muestra una máquina cuyos descansos se están moviendo verticalmente en contrafase. La máquina tiene un movimiento de vaivén, es decir, cuando el descanso del lado derecho se mueve hacia arriba, el del lado izquierdo se mueve hacia abajo y en forma viceversa.

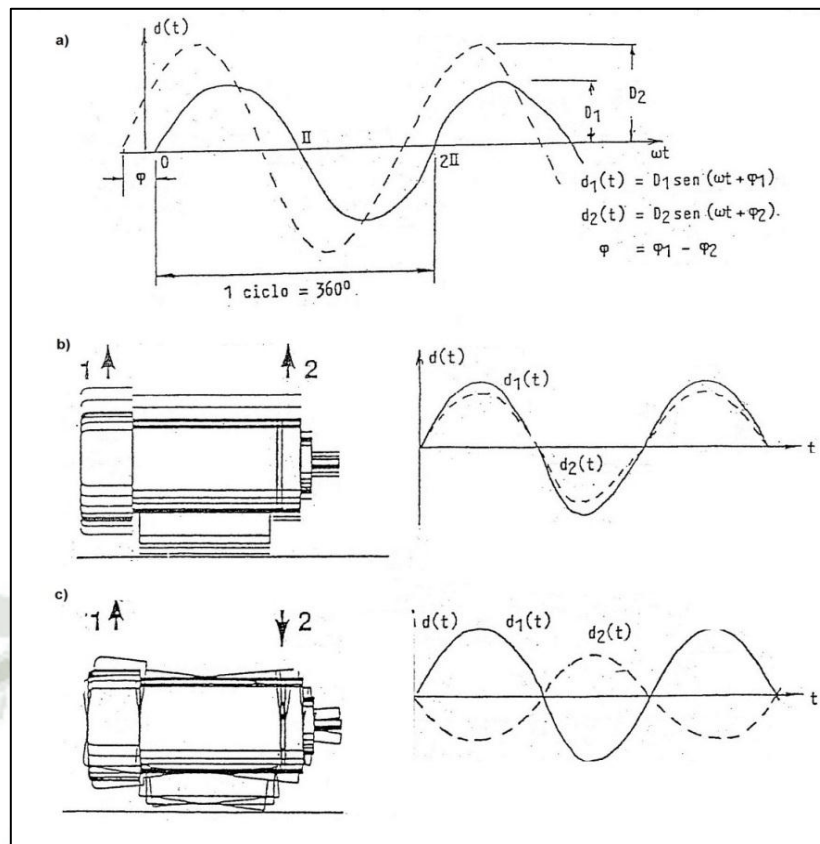


Figura 2. 7: Vibraciones con diferencia de Fase

Fuente: [Análisis Vibracional Avanzado, Universidad de Concepción, 2010]

2.5. Parámetros y unidades de medición

2.5.1. Desplazamiento

Es el cambio de en la distancia o posición de un objeto con respecto a un punto referencial. La magnitud del desplazamiento se conoce como amplitud. Cuanto mayor sea la amplitud de las señales de la vibración,

más grave será. La amplitud puede ser medida en mm, aunque en la práctica es medida en micras P-P o mils P-P.

Es usado como una medida para vibraciones de baja frecuencia (inferiores a 1200 CPM) en cajas de cojinetes y estructuras. El desplazamiento es normalmente utilizado para determinar el movimiento relativo entre el eje y su cojinete.

2.5.1.1. Desplazamiento absoluto

Es usado para vibraciones estructurales de baja frecuencia (0 a 20 Hz) y la vibración del eje (0 a 10 Hz), relativo esfuerzo (eje o estructura) y es típicamente medido con un acelerómetro doblemente integrado. El desplazamiento absoluto de un eje debe ser medido con un sensor de contacto o de no contacto en combinación con un sensor sísmico montado sobre el pedestal del cojinete. Desafortunadamente, la frecuencia también debe ser considerada cuando la severidad del desplazamiento y de la aceleración es evaluada.

2.5.1.2. Desplazamiento Relativo

Es medido con un sensor de no contacto de desplazamiento relativo, el sensor de proximidad, muestra la magnitud de tolerancia del cojinete tomando por vibraciones y es usado sobre un amplio rango de frecuencias tan ancho como la velocidad del eje. Este montaje permanente del sensor mide el movimiento relativo entre el punto de montaje y el rotor.

2.5.2. Velocidad

Es la tasa de variación en el desplazamiento. La velocidad es un excelente indicador de problemas de vibraciones en cuanto a

maquinaria de velocidad media (por ejemplo: desbalance, desalineación, soltura mecánica y las frecuencias de fallas en problemas avanzados de rodamientos). Es expresada en unidades de velocidad, tal como mm/seg o pulg/seg.

Depende del desplazamiento y de la frecuencia, está directamente relacionada con la fatiga en las máquinas. A mayor desplazamiento y/o frecuencia de vibración, mayor será la severidad de la vibración en el punto de medición de la máquina.

Fórmula 2.2: Ecuación de Velocidad

$$\text{Velocidad} = \text{Desplazamiento} \times 2\pi \times f \text{ [m/s]}$$

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

2.5.3. Aceleración

Es la rapidez del cambio de velocidad. Está relacionado a la velocidad y a la frecuencia. Por la segunda ley de Newton es la fuerza sobre una maquina dividido por su masa.

Es la medida dominante a altas frecuencias. Es proporcional a la fuerza sobre los componentes de una maquina tales como engranajes y es utilizado para evaluar la condición de una máquina cuando las frecuencias exceden a 1000 HZ (60 000 CPM)

En engranajes y cojinetes.

Fórmula 2.3: Ecuación de aceleración

$$\text{Aceleración} = \text{Velocidad} \times 2\pi \times f \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

Fórmula 2.4: Ecuación de aceleración

$$\text{Aceleración} = \text{Desplazamiento} \times (2\pi \times f)^2 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

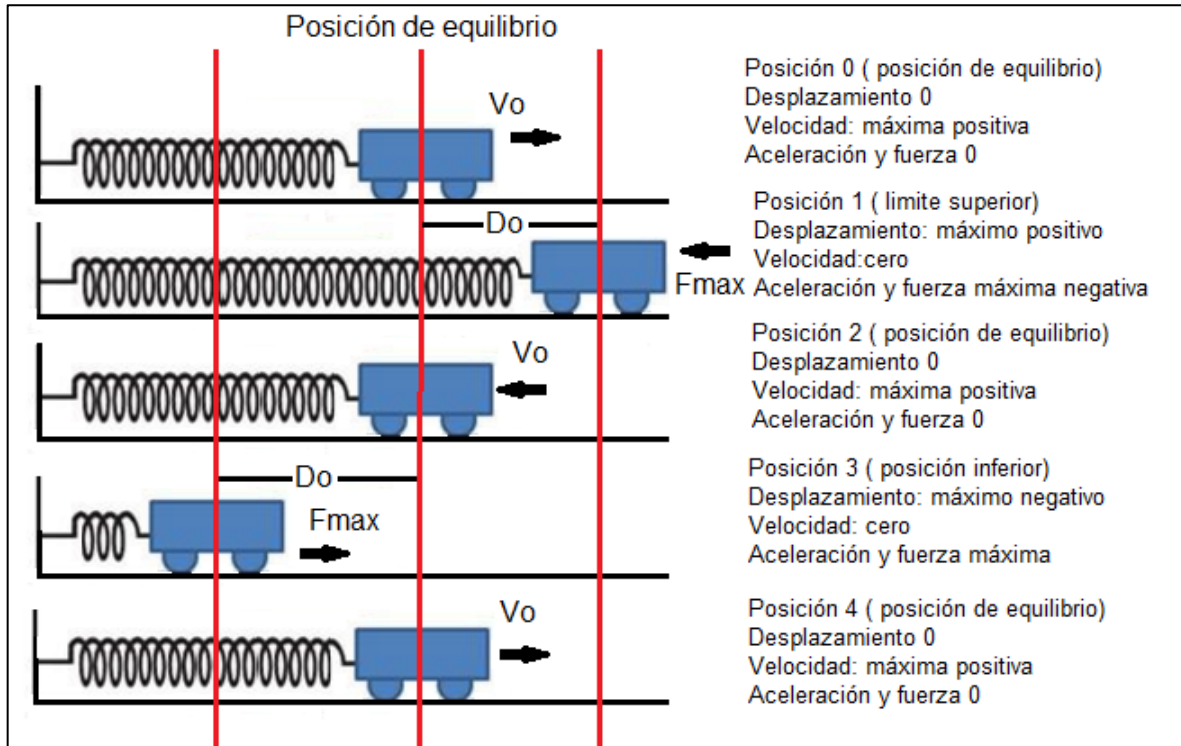


Figura 2. 8: Desplazamiento, velocidad y aceleración para una vibración armónica

Fuente: [Universidad de Concepción, 2010]

La Tabla 2.1, muestra las unidades de vibración de respecto a cada medida con una descripción de cada una de estas.

Tabla 2. 1: Medidas de vibración

| Medida | Unidades | Descripción |
|--------|----------|-------------|
|--------|----------|-------------|

| | | |
|----------------|--------------------------|--|
| Desplazamiento | Micras p-p mils p-p * | Movimiento de la máquina, estructura, o rotor; relativo al esfuerzo |
| Velocidad | mm/seg pulg/seg** | Rapidez del cambio del desplazamiento y esta relacionado a la fatiga |
| Aceleración | g's *** | Está relacionado con las fuerzas presentes en los componentes de la máquina |

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

La Tabla 2.2, muestra los rangos de frecuencia que se requieren para realizar una medida determinada, el parámetro físico de cada una de estas; así como, lo aplicación de cada medida que se utiliza.

Tabla 2. 2: Medidas de Vibraciones de Máquinas

| Medida | Rango útil de frecuencia | Parámetro Físico | Aplicación |
|-------------------------|--------------------------|---------------------|---|
| Desplazamiento relativo | 0 - 1,000 Hz | esfuerzo/movimiento | Movimiento relativo en cojinetes/carcasas |
| Desplazamiento absoluto | 0 - 20 Hz | esfuerzo/movimiento | Movimiento estructural |
| Desplazamiento absoluto | 0 - 10 Hz | esfuerzo/movimiento | Condición de la máquina |
| Velocidad | 10 - 1,000 Hz | energía/fatiga | Condición general de la máquina, vibraciones a media frecuencia |
| Aceleración | > 1,000 Hz | Fuerza | Condición general de la máquina, vibraciones a alta frecuencia |

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

La Tabla 2.3, se muestra los rangos de frecuencia por cada componente para los colectores de datos.

Tabla 2. 3 Rango de frecuencias

| Componente | Rango |
|-----------------------|-----------|
| Vibración del eje | 10 x RPM |
| Caja de engranajes | 3 x GM |
| Rodamientos | 10 x BPFI |
| Bombas | 3 x VP |
| Motores / Generadores | 3 x 2 LF |
| Ventiladores | 3 x BP |
| Cojinetes de fricción | 10 x RPM |

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

La Tabla 2.4, se muestra los las medidas para máquinas específicas.

Tabla 2. 4: **Medidas para Máquinas**

| Máquina | Velocidad | Medida (s) | Frecuencia Forzantes |
|--|--|---|---|
| Ventiladores | Hasta 1200 RPM Sobre 1800 RPM | Velocidad Velocidad y aceleración | Velocidad de operación, falla de rodamientos, paso de alabes, ruido de flujo. |
| Motores | Debajo de 1200 RPM Sobre 1800 RPM | Velocidad Velocidad y aceleración | Velocidad de operación, falla de rodamientos, falla eléctricas. |
| Bombas centrífugas | Hasta 1800 RPM Sobre 1800 RPM | Velocidad Velocidad y aceleración | Velocidad de operación, paso de alabes, ruido de flujo, falla de rodamientos. |
| Caja de engranajes de alta velocidad | Velocidad de entrada hasta 1800 RPM | Velocidad y aceleración | Velocidad de operación, frecuencia de engrane |
| Accionamiento mecánico en turbinas a vapor | De 5000 RPM hasta 10000 RPM | Velocidad | Velocidad de operación |
| Generación de potencia turbinas | Hasta 3600 RPM | Velocidad | Velocidad de operación |
| Turbina a gas | 3600 RPM | Velocidad y aceleración | Velocidad de operación, frecuencia de engrane |
| Compresores centrífugos | 10000 RPM | Velocidad | Velocidad de operación |
| Eje de alta velocidad | Sobre 2000 RPM | Aceleración | Velocidad de operación, falla de rodamientos |
| Rodillos | Hasta 1800 RPM Sobre 1800 RPM | Velocidad Velocidad y aceleración | Velocidad de operación, falla de rodamientos |
| Generadores | 1800 RPM 3600 RPM | Velocidad | Velocidad de operación, eléctricas |

Fuente: [Vibration Level 3, Vibration Institute, 2012]

2.6. Colección de datos y análisis

2.6.1. Espectro de Vibración.

En las máquinas rotativas se produce las vibraciones por una variación de fuentes. La mayoría de la fuentes están relacionadas con la velocidad de giro, pueden ser múltiplos o submúltiplos de la velocidad de giro. Y otras frecuencias no están relacionadas a esta. Cada fuente produce su propia frecuencia que es única y tiene un patrón de frecuencia determinado.

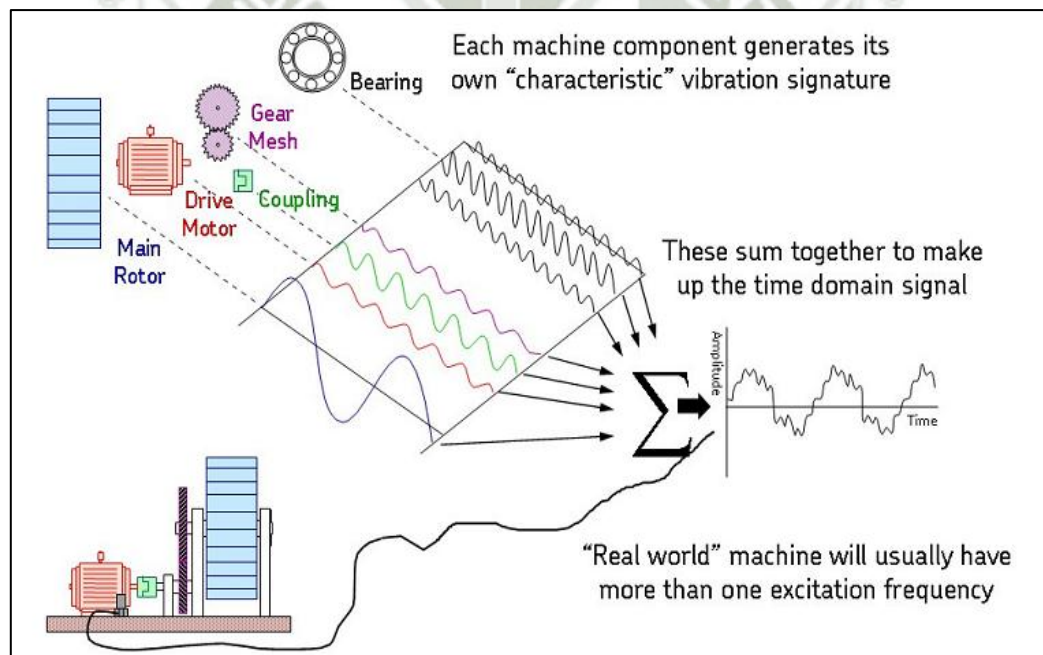


Figura 2. 9: Combinación de Fuentes

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

Cada componente que constituye una máquina rotativa que genera señales de vibraciones únicas. Cuando se mide las vibraciones de una máquina, el sensor o transductor lee la combinación de todas, ejemplo mostrado en la Figura 2.9 se puede apreciar que se combinan una gran variedad de fuentes de vibración.

Los picos de un espectro de vibraciones provienen de dos factores importantes y básicos; la fuerza y la movilidad como se muestra en la Figura 2.10.

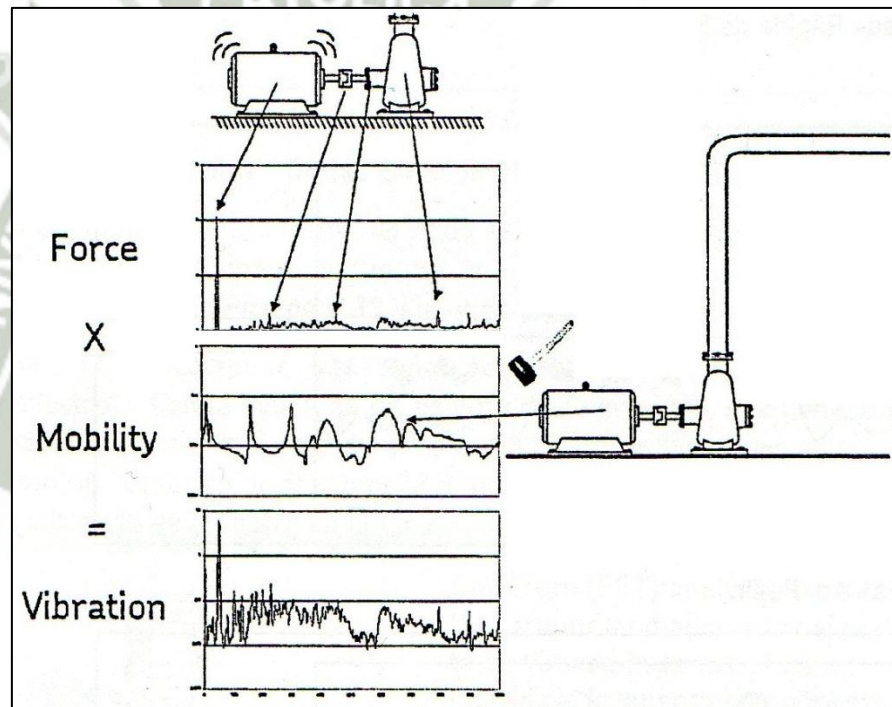


Figura 2. 10: Fuerza x Movilidad = Vibración

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

2.6.2. Armónicos

Frecuentemente la vibración de una máquina se compone de componentes en la frecuencia fundamental y los múltiplos de esta.

La velocidad de operación de la máquina se refiere a veces como el componente fundamental y los múltiplos exactos de la velocidad se les conocen como armónicos. Entonces, la vibración a la velocidad de giro se refiere a “1X” componente fundamental; “2X” la velocidad de giro por dos veces la fundamental; “3X” la velocidad de giro por 3 veces la fundamental, etc.

2.7. Rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos los cuales emplean pequeños elementos rodantes para disminuir la fricción entre las piezas conectadas a un eje y el eje mismo, dado que la resistencia de fricción por rodadura es menor que la resistencia de fricción por deslizamiento, además sirve de apoyo y facilita el deslizamiento de estas piezas.



Figura 2. 11: Constitución de un rodamiento

Fuente: [Technical Associates of Charlotte, 1994]

2.7.1. Designación de Rodamientos

Esta designación está conformada por el nombre del rodamiento, seguida de la denominación abreviada del mismo, la cual se compone de una serie de números y códigos de letras agrupados en un código numérico básico y un código suplementario.

La designación básica se compone de una serie de cifras, cuyo significado es el siguiente:

- Tipo de rodamiento
- Serie dimensional ISO de anchura
- Serie Dimensional ISO de sección de diámetro
- Tamaño (diámetro del eje)

Si las condiciones de servicio exigen una versión especial de rodamiento, este contendrá un código suplementario.

- Diseño (interno, externo, jaula, etc).
- Precisión juego interno.
- Materiales, tratamiento térmico.
- Estabilización termina.
- Lubricación.
- Factores relacionados con las especificaciones y la constitución interna del rodamiento.

2.7.1.1. Tipos de Rodillos

Los tipos de rodillos son proporcionales al punto y línea de contacto como se ve en la Figura 2.12, la diferencia básica entre las dos familias de rodamientos está en el área de contacto de los elementos rodantes. En los rodamientos de bolas estos tienen punto de contacto, mientras que en los rodamientos de rodillo tienen línea de contacto de los elementos rodantes. Los niveles de tensión en el rodamiento son directamente proporcionales a la carga aplicada sobre el área de contacto de los elementos rodantes. Cuanto mayor sea el nivel de tensión, menor será la vida de los rodamientos. Debido a esto a la fricción también aumenta con un mayor contacto, los rodamientos de bolas son más adecuados para cargas, ligeras y velocidades más altas, mientras que los rodamientos de rodillos se utilizan para cargas más pesadas y aplicaciones de baja velocidad.

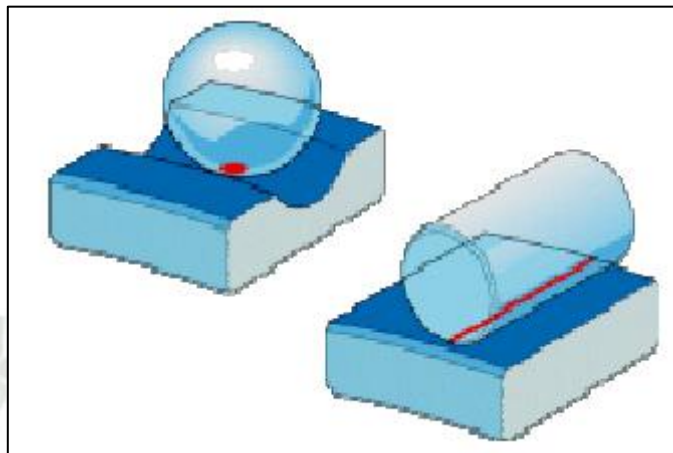


Figura 2. 12: Punto y Línea de Contacto

Fuente: [Catalogo SKF, 2008]

En los rodamientos la forma de los elementos rodantes a menudo identifica las aplicaciones para las cuales son más adecuados los rodamientos. Las diferentes formas de los rodillos dan a cada rodamiento características únicas, los tipos de elementos rodantes son los siguientes:

- Rodamiento Rígido de Bolas.
- Rodamiento Rodillo cilíndrico.
- Rodamiento Casquillos de aguja.
- Rodamientos de rodillos de aro angular.
- Rodamientos de rodillos asimétricos.

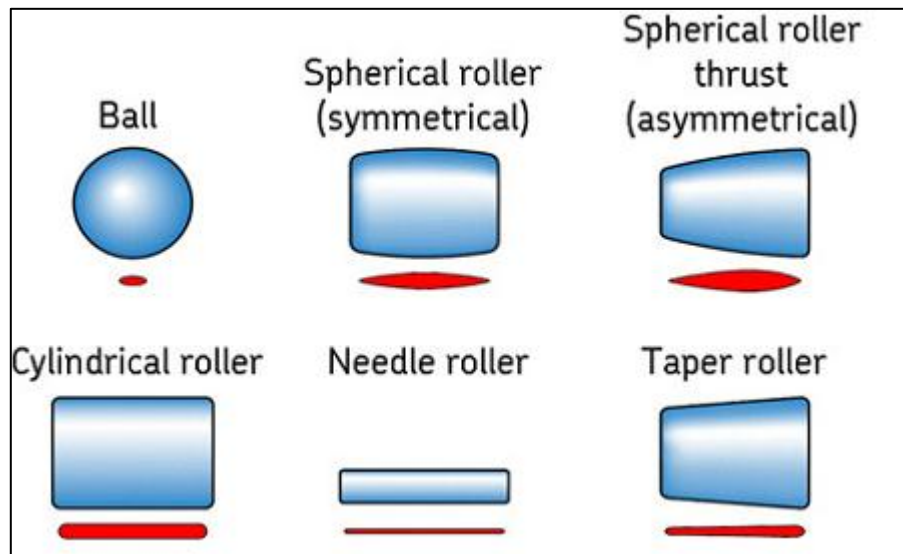


Figura 2. 13: Tipos de Rodamientos

Fuente: [Catalogo SKF, 2008]

2.7.1.2. Ángulo de Contacto

Los ángulos de contacto de los rodamientos varían de cero grados en el caso de los rodamientos rígidos de bolas a 90° para los rodamientos de bolas de empuje, los cuales están hechos para aceptar solo carga a lo largo del eje (cargas de empuje). En funcionamiento, los ángulos de contacto pueden variar un poco del diseño original.

El desarrollo de las jaulas fue la clave para avanzar en la tecnología de los rodamientos. Ella provee separación y guía a los elementos rodantes, reduciendo sustancialmente la fricción y el calor.

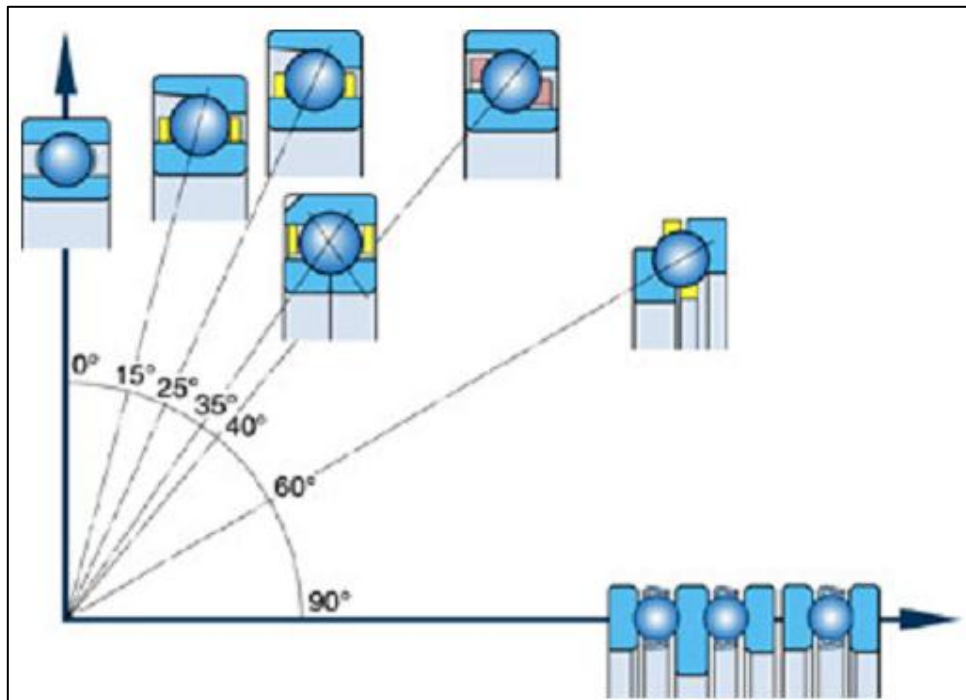


Figura 2. 14: Angulo de contacto

Fuente: [Catalogo SKF, 2008]

2.7.1.3. Jaula de rodamientos

Los elementos rodantes ahora con el avance de estudio de los rodamientos se modificaron introduciendo a los rodamientos jaulas entre rodamientos; las jaulas permiten que los elementos rodantes puedan permanecer separados reduciendo así la fricción y el calor, en la Figura 2.15 los elementos rodantes sin jaula o canastilla generan fricción entre ellos a comparación de los de canastilla.

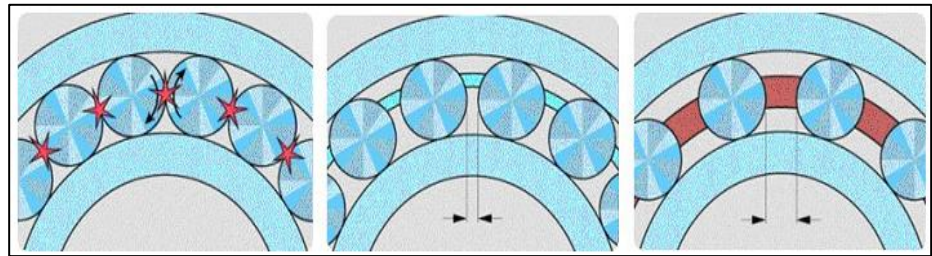


Figura 2. 15: Jaula en rodamientos

Fuente: [Catalogo SKF, 2008]

Las jaulas de los rodamientos tienen como principal función preservar que los elementos rodantes estén en su sitio y evitar el contacto entre los elementos de rotación de rodadura. La jaula también lleva los elementos rodantes por la zona de no carga del cojinete y ayuda a guiar a los elementos rodantes. Mantener los elementos rodantes igualmente distribuidos alrededor de la circunferencia completa para proporcionar una distribución uniforme de carga y un recorrido uniforme.

A los elementos rodantes los orientan en la zona de no carga para mejorar las condiciones de rodamiento en el cojinete y evitar movimiento de deslizamientos perjudiciales. También tienen como función mantener los elementos rodantes, donde los rodamientos están separados por un diseño diferente y un sello que se elimina durante el montaje.

2.7.2. Estadísticas de fallas en rodamientos

La importancia que tienen los rodamientos en la industria con el pasar de los años se ha investigado que es muy alta, una falla catastrófica en un rodamiento que no está dentro de lo programado por mantenimiento ni por su vida útil dado por el fabricante. Esta falla provoca inevitablemente una pérdida en la producción por tiempo de paradas y tiempo para el mantenimiento y compra del repuesto. En consecuencia, estos producen gastos de pérdida de producción y gasto por la reparación.

Por eso, al detectar el estado en que se encuentran los rodamientos de la máquina y prever las fallas incipientes que se pueden presentar.

En el análisis vibracional en la búsqueda de problemas que afectan los rodamientos, según datos estadísticos se puede afirmar que, el porcentaje de rodamientos que vienen dañados por fábrica es muy bajo, debido a que la mayoría de empresas que fabrican rodamientos tienen un estricto sistema de control de calidad. Por eso se sabe que la mayor fuente de falla de los rodamientos radica en otras condiciones.

En la Figura 2.16 se muestra datos estadísticos que fueron tomados con varios rodamientos de diferentes marcas y fueron analizados en el centro técnico de NSK que es una empresa que fabrica rodamientos en Estados Unidos. En cuanto a la vida útil, se puede observar que muy pocos rodamientos llegan a la vida útil que fue calculada. La vida útil de estos rodamientos puede ser afectada por varios factores de operación y mantenimiento. Por lo tanto, se deben conocer y estudiar maneras que ayuden a minimizar los factores que afectan a la vida útil de los rodamientos.

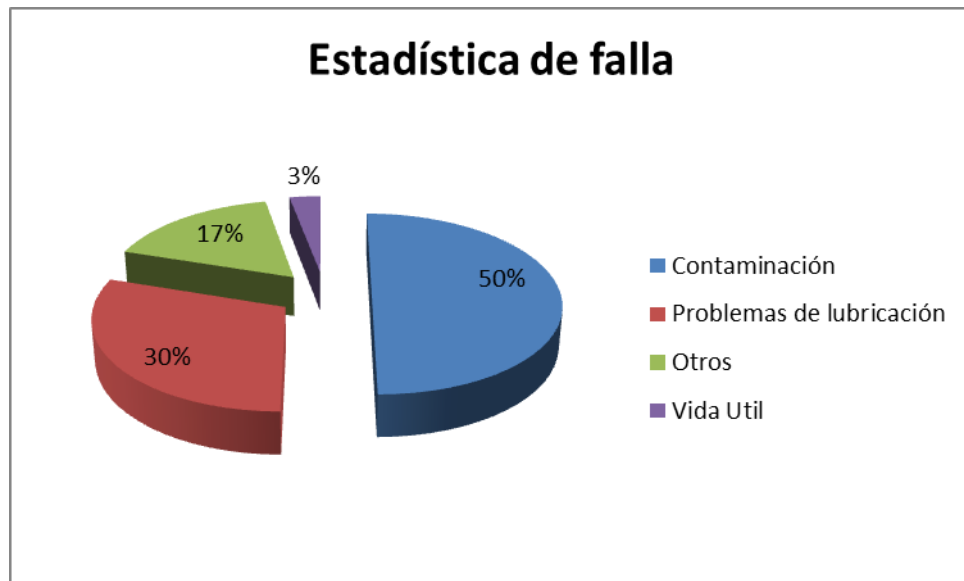


Figura 2. 16: Estadística de fallas en rodamientos

Fuente: [NSK United States, 2012]

Como se aprecia en la Figura 2.16, se puede hablar de tres causas que afectan que el rodamiento no llegue a su vida útil calculada por el fabricante, las consecuencias que pueden presentar son las siguientes:

2.7.2.1. Falla por contaminación

En este grupo encuentran desde contaminaciones en estado líquido, como puede ser la presencia de agua en el lubricante del rodamiento y contaminaciones sólidas, como partículas metálicas que son arrastradas por el lubricante en el interior, también se puede encontrar contaminación con polvo. En la Figura 2.17 existen abolladuras en la pista interna del rodamiento.

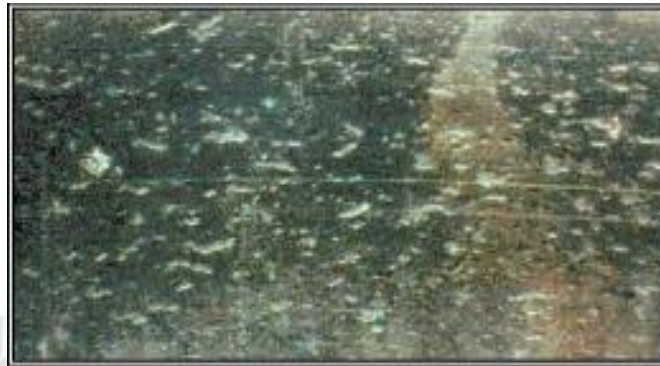


Figura 2. 17: Problema de contaminación

Fuente: [NSK United States, 2012]

2.7.2.2. Falla por problemas de lubricación

Existen problemas de lubricación cuando la grasa que lubrica al rodamiento es demasiado dura para la aplicación que se requiere, también en problemas de lubricación esta cuando existe deficiencia de lubricante, que hace que los rodamientos disminuyan su vida útil. En la Figura 2.18 la pista interna presenta desgaste debido a la deficiente lubricación.

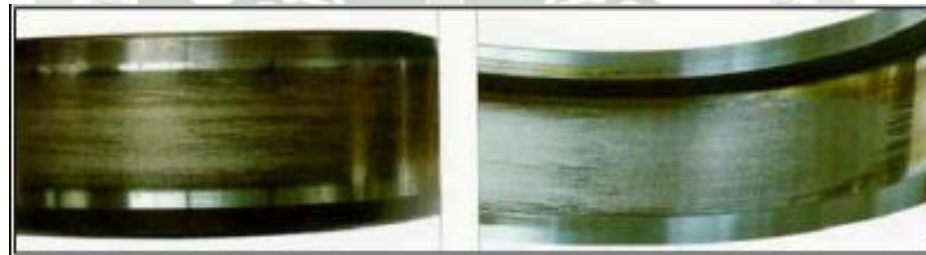
En la Figura 2.19 el rodamiento tiene ralladuras en las pistas debido a mala lubricación y una grasa excesivamente dura.

Figura 2. 18: Problema de Lubricación inadecuada



Fuente: [NSK United States, 2012]

Figura 2. 19: Problema de Lubricación inadecuada



Fuente: [NSK United States, 2012]

2.7.2.3. Falla por montaje incorrecto y otros

En el estudio realizado por NSK juntaron es este grupo las anomalías que afectan con el correcto funcionamiento del rodamiento. Entre estos está el mal montaje, maltrato del rodamiento, mal almacenamiento y mal ajuste del rodamiento en su alojamiento.

En la Figura 2.20 el rodamiento entra apretado en el eje, por lo cual las bolas desgastan la pista interna del rodamiento.

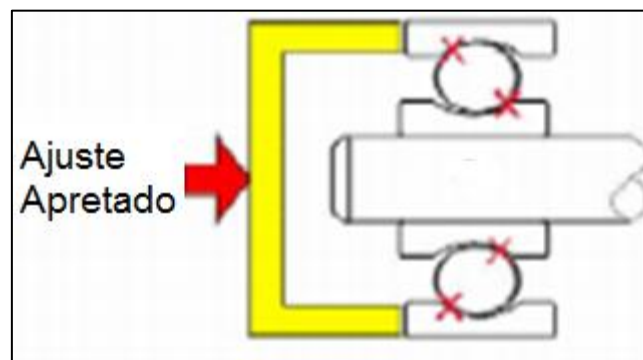


Figura 2. 20: Problema de mal montaje

Fuente: [NSK United States, 2012]

En la Figura 2.21, la pista interna presenta abolladuras de las bolas, debido a una caída del rodamiento.



Figura 2. 21: Problema de impacto por caída

Fuente: [NSK United States, 2012]

Determinación de la condición de rodamientos mediante análisis espectral

La señal de vibración emitida por un rodamiento puede contener componentes espectrales que están relacionados con la geometría del rodamiento, el número de elementos rodantes, la velocidad de rotación, la lubricación del defecto y el tipo de carga aplicada. Es de gran importancia en la industria moderna para detectar defectos de rodamientos. Es relativamente fácil reconocer fallas al ver el gráfico de amplitud vs frecuencia, ya que se caracteriza por tener muchos picos juntos a altas frecuencias y de amplitud variable que dependerá de la gravedad del problema.

La frecuencia a la que se produce la máxima amplitud da una idea del elemento defectuoso del rodamiento.

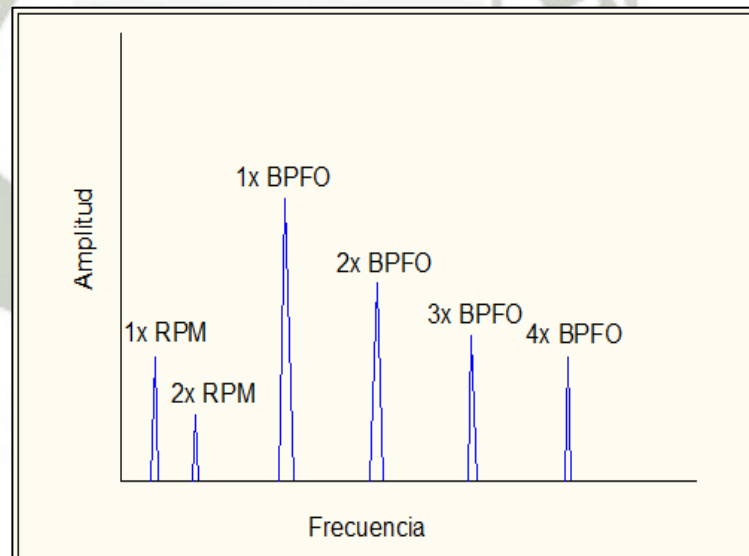


Figura 2. 22: Espectro de un rodamiento defectuoso

Fuente: [Elaboración Propia]

Las frecuencias de paso son generadas cuando las bolas o rodillos pasan por algún defecto en las pistas de rodadura. La frecuencia generada en la pista externa es aproximadamente igual al 40 % del producto del número de bolas por la frecuencia de rotación, la frecuencia generada en la pista interna se aproxima al 60 % del producto anterior. Se debe al 40 % de las bolas pasan por un defecto en la pista externa durante cada revolución y un 60 % de ellas lo hace por la pista interna en cada revolución. La geometría del rodamiento es proporcional a su tamaño.

La frecuencia fundamental del tren de elementos, es la velocidad de rotación del conjunto jaula y elementos rodantes. Esta frecuencia no se encontraba frecuentemente, pero puede ocurrir cuando algún defecto afecta la rotación del tren de elementos.

La frecuencia de rotación de la unidad es generada por la rotación de la unidad y es causada por el desbalance residual de ella y/o por excentricidades.

2.7.2.4. Frecuencias características de fallas en rodamientos.

Cada elemento del rodamiento, posee una frecuencia característica de falla según sea sus características dinámicas. En todos los casos los rodamientos están compuestos por cuatro elementos:

- Pista interna
- Elementos rodantes
- Jaula
- Pista externa.

Cada uno de estos elementos cuenta con su propia frecuencia característica de falla. Las frecuencias características son una forma de identificar donde se encuentra localizada la falla en el interior del rodamiento.

Tabla 2. 5: Descripción de fallas características

| Nomenclatura | Localización de las fallas |
|---|--|
| BPFO (ball pass frequency of the outer race) | Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa. |
| BPFI (ball pass frequency of the inner race) | Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto de la pista interna. |
| FTF (Fundamental train frequency) | Frecuencia de rotación de porta elementos o jaula. |
| BSF (ball spin frequency) | Frecuencia de giro de los elementos rodantes |

Fuente: [Technical Associates of Charlotte, 1995]

Para calcular el valor de las frecuencias de fallas en rodamientos existen expresiones matemáticas para cada uno de los componentes, que es muy útil para identificar estas frecuencias en el espectro. Las expresiones matemáticas se detallan en la Tabla 2.6.

Tabla 2. 6: Expresiones matemáticas de frecuencias de falla

| Expresión Matemática | Observación |
|--|--------------------------------|
| $BPFO = \frac{RPM * n}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{dm}\right) \approx 0.4RPM * n$ | Bastante cercana a la realidad |
| $BPFI = \frac{RPM * n}{2} \left(1 + \frac{d \cos \beta}{dm}\right) \approx 0.6RPM * n$ | Bastante cercana a la realidad |
| $FTF = \frac{RPM}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{dm}\right)$ | Netamente teórica |
| $BSF = \frac{RPM * dm}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{dm}\right)^2 \cos^2 \beta\right]$ | Netamente teórica |

Fuente: [Technical Associates of Charlotte, 1995]

Dónde:

RPM: Frecuencia de rotación del eje.

Di: Diámetro de la pista interna.

De: Diámetro de la pista externa.

n: Número de elementos rodantes.

dm: Diámetro entre los centros de los elementos rodantes.

d: Diámetro de los elementos rodantes.

β : Ángulo de contacto

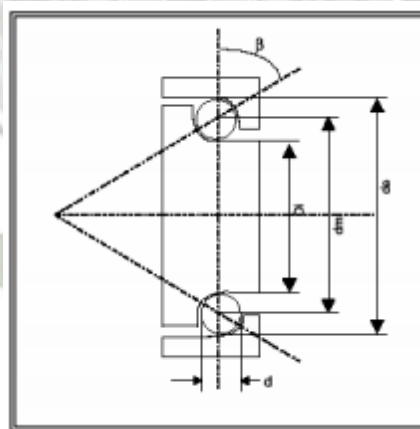


Figura 2. 23: Esquema de dimensiones de un rodamiento

Fuente: [Technical Associates of Charlotte, 1995]

2.7.2.5. Etapas de las fallas en rodamientos

Los rodamientos por lo general presentan una evolución de fallas que son parecidas entre sí. Todas las fallas empiezan en un etapa incipiente que solo se puede apreciar a muy alta frecuencia. A medida que esta falla avanza con el tiempo se comienza a apreciar modulaciones en torno a las frecuencias características del rodamiento. Cuando la falla ya es inminente se dejan ver excitadas las frecuencias características de los elementos del rodamiento a una baja frecuencia.

a) Primera etapa.

Esta es la etapa más primitiva, donde se hace presente los “Spike Energy”, ondas de esfuerzos. En esta etapa sobre los 2000Hz, se presentan frecuencias de muy baja amplitud, casi despreciable en comparación de otras frecuencias menores que tienen amplitudes mayores como las que se pueden encontrar en la zona A, en las que se encuentra todas las frecuencias referentes al funcionamiento de la máquina, como por ejemplo la frecuencia de velocidad de giro o desperfectos de la máquina, como desalineamiento o desbalance.

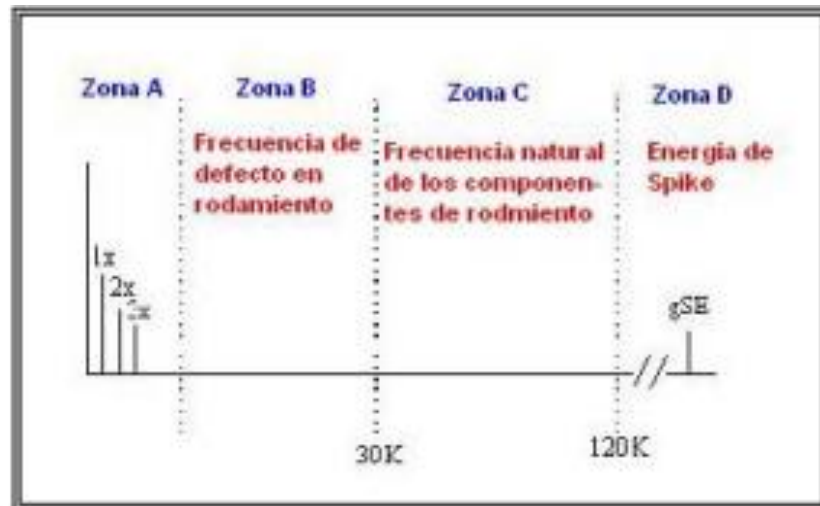


Figura 2. 24: Primera etapa de falla incipiente

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

b) Segunda etapa

En esta etapa, ya aparece con una mayor excitación la frecuencia natural de los rodamientos con ciertas bandas laterales a su alrededor, lo que deja en evidencia que existen señales que se están modulando. Estas frecuencias de fallas que son características se localizan en un rango de frecuencia que está sobre 500 Hz y antes de los 2000 HZ.

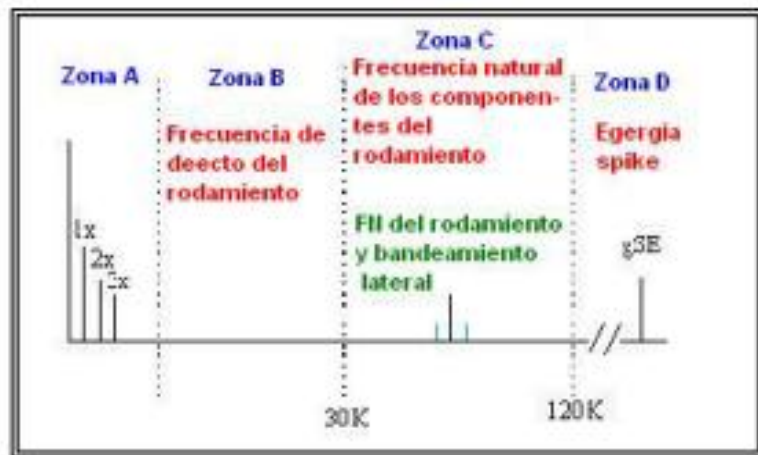


Figura 2. 25: Segunda etapa

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

c) Tercera etapa.

En esta etapa se presentan posibles fallas catastróficas, el rodamiento acá se encuentra en un progresivo desgaste, aparecen las denominadas frecuencias naturales. En esta fase durante la interpretación se puede analizar que mientras más armónicos se presenten el componente estará más crítico.

En esta etapa el desgaste que tiene el rodamiento es visible y se puede recomendar que prevean para un cambio de rodamiento.

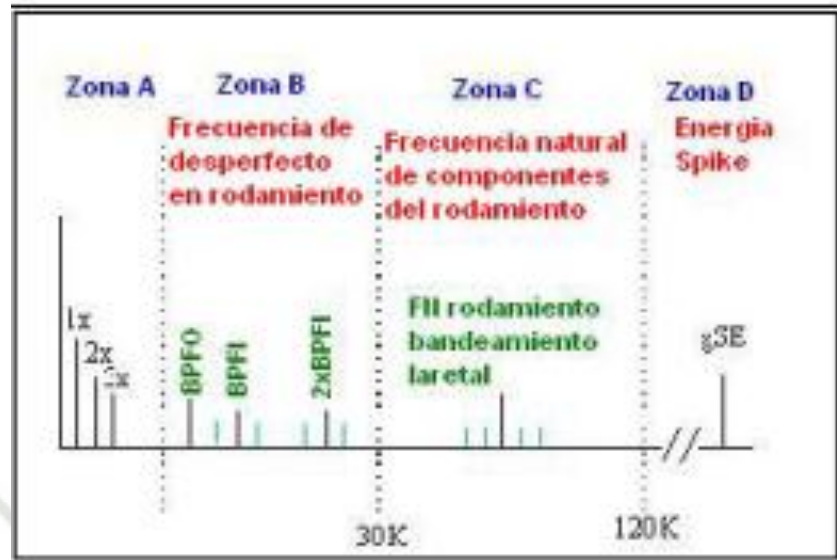


Figura 2. 26: Tercera Etapa

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

d) Cuarta etapa

En esta etapa, las frecuencias características de falla no se logran ver porque existen vibraciones aleatorias acompañadas de ruido de fondo.

Lo que se quiere evitar es que se llegue a esta etapa, ya que en estas condiciones de funcionamiento varios de los componentes de la máquina estarán dañados a causa de los esfuerzos a los que está sometida. Sin duda una máquina trabajando con sus rodamientos en ese estado, vera comprometido otro de sus elementos. Por lo que, la sustitución del rodamiento ya no bastara, sino que también esta máquina tendrá que ser sometida a una reparación mayor.

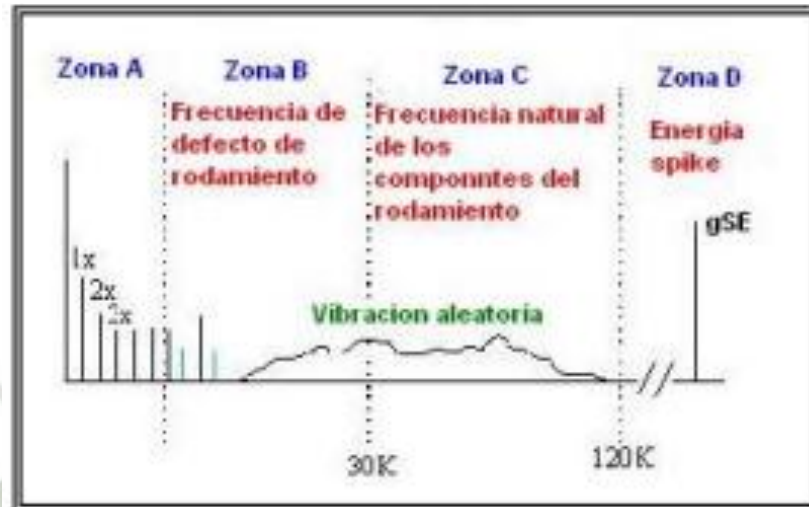


Figura 2. 27: Cuarta Etapa

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

2.7.2.6. Técnicas de análisis para detectar fallas en rodamientos

Existen varias técnicas para el análisis y diagnóstico de los rodamientos. Las técnicas que se tienen hoy en día en el ámbito industrial son los siguientes:

- Análisis de vibraciones, ruido y ondas.
- Análisis por termografía.
- Análisis de aceite.

Las técnicas más importantes para el análisis de vibraciones y que son usadas en las industrias.

- Método de demodulación

El proceso de demodulación es relativamente sencillo y consiste básicamente en seleccionar un espectro vibratorio que contenga el componente a analizar, este es extraído del resto del espectro usando un filtro pasa banda o pasa alto. Luego, con la ayuda de filtros pasa bajos, se obtiene la envolvente de la señal en el tiempo, la cual solo contiene las componentes de baja frecuencia. Este método analiza los cambios de amplitud de las señales vibratorias, en especial si estos cambios son periódicos o aleatorios.

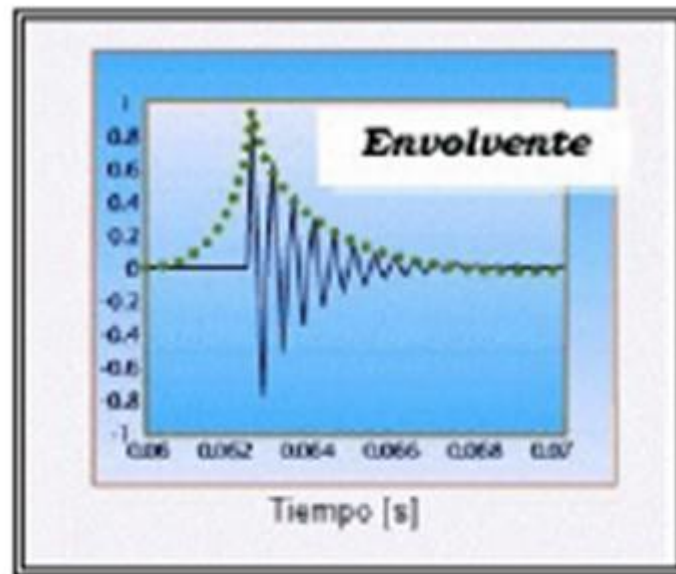


Figura 2. 28: Muestra de análisis de envolvente

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

En la Figura 2.29 se cuenta con una señal temporal de entrada, que con la ayuda de un filtro ya se pasa alto o pasa banda entrega solo las frecuencias que exceden cierto valor, en este caso de altas frecuencias.

Con ayuda de los amplificadores entra una señal con una resolución y con una forma casi perfecta. A esta señal se le aplica un envolvente, de manera tal de mostrar la mejor curva de los picos.

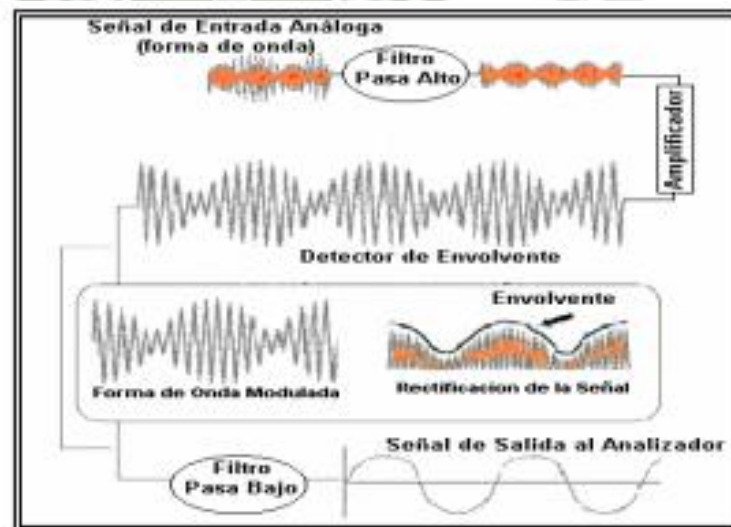


Figura 2. 29: Proceso de demodulación

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

En muchos de los textos de análisis vibracional lo hacen como método de demodulación o envolvente. Esto es porque este

método junta dos técnicas o algoritmos que trabajan en base a tiempo real (análisis de modulación y de envolvente) para tener mejores resultados.

- Método de PeakVue

Es una técnica de análisis para señales que son generadas a alta frecuencia, el objetivo es estudiar el comportamiento de elementos cuyas fallas se aprecian a altas frecuencias y baja amplitud, como es el caso de los rodamientos. Los rodamientos en una falla incipiente generan frecuencias de fallas características a altas frecuencias pero baja amplitud, ya cuando la falla va avanzando con el tiempo aumentan las amplitudes y aparecen las frecuencias características de falla de los rodamientos y es cuando ya se requiere una reparación de los componentes.

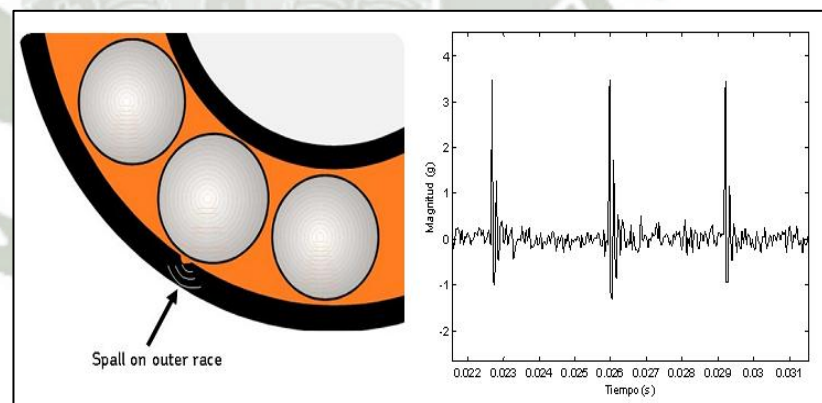


Figura 2. 30: Ondas de Esfuerzo

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

Como se aprecia en la Figura 2.30 los impulsos son de una baja amplitud, pero el rodamiento tiene una falla localizada y los elementos rodantes van a estar pasando sobre ella constantemente, es que se tiene que la frecuencia de este defecto es relativamente alta.

La falla emite frecuencias tan bajas en amplitud que en la mayoría de los casos, son casi imperceptibles con otras técnicas, como el espectro aceleración tomado en una rutina normal del mantenimiento, debido a la despreciable energía vibratoria.

Esta técnica centraliza su análisis a frecuencias altas donde se están generando las ondas de esfuerzos y toma como dato el valor pico de un pequeño periodo.

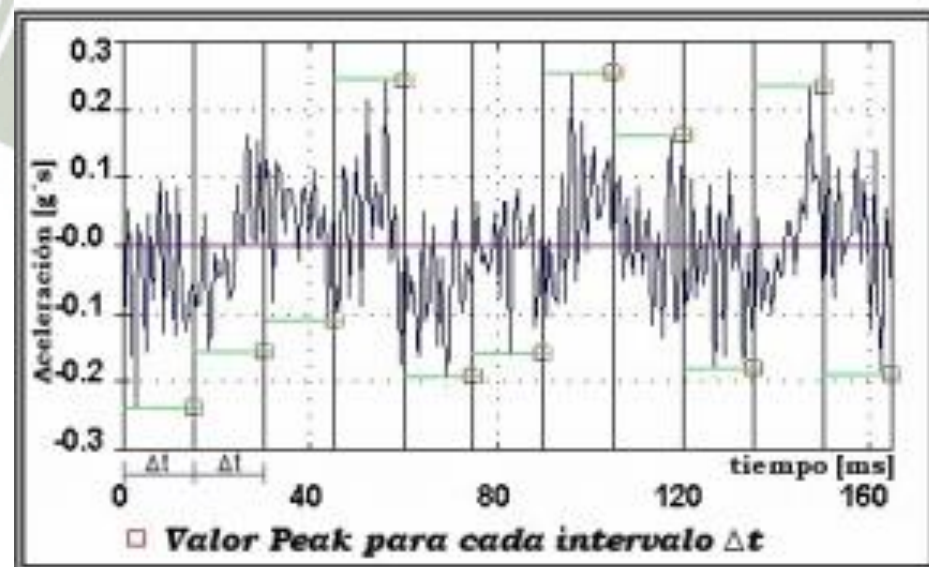


Figura 2. 31: Datos Peak Vue

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

De esta forma, la herramienta garantiza que las frecuencias que se van a estudiar efectivamente las que, en adelante comenzaran a dar problemas.

Se debe de tener en cuenta que un aspecto fundamental para tener buenos datos es que el sensor que se debe de utilizar debe de ser de al menos de 30 KHz, debido a que la técnica de Peakvue es de alta frecuencia.

El contacto metal con metal genera pequeños impactos, que son la fuente de excitación en el sistema a analizar, estos impactos son los que generan los picos. Con estas informaciones de los picos se puede pronosticar el estado interno del rodamiento y que se recomienda que hacer con él. El peakvue ha desarrollado la forma para detectar la presencia de ondas de esfuerzo debido al contacto de metal con metal durante la etapa temprana de falla.

En el trabajo con peak vue se hace necesario utilizar filtros, específicamente pasa altos. La misión de estos filtros es eliminar las frecuencias bajas del espectro para dedicarse a estudiar únicamente de las frecuencias altas, que es lo que nos va a dar información de las fallas incipientes. Eliminando las frecuencias de baja, también se eliminaran también las informaciones del estado general de la máquina, como por ejemplo desbalance o desalineamiento. El filtro pasa alto como se puede apreciar en la

Figura 2.32 solo dejara que se vean frecuencias que están sobre el filtro.

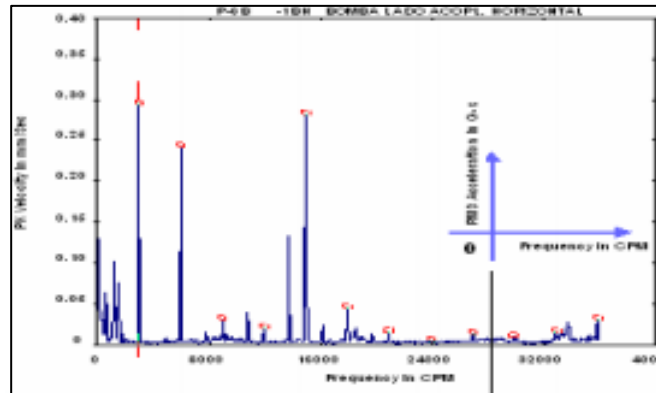


Figura 2. 32: Peak vue con filtro

Fuente: [Universidad de concepción]

3. TOMA DE DECISIONES PARA EL ANÁLISIS

3.1. Introducción

El laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Católica de Santa María, esta implementado con máquinas para las prácticas de Procesos de Manufactura. Estas máquinas contienen motores eléctricos para el funcionamiento de estos de los cuales se harán el estudio de sus vibraciones a altas frecuencias.

Las máquinas tienen diferente grado de importancia en cuanto a la función que cumplen dentro del laboratorio. Para determinar la importancia, se considera los siguientes criterios:

- El costo del equipo.

- Importancia dentro del proceso.
- Su complejidad durante el mantenimiento.

Como criterios adicionales se considera lo siguiente:

- El costo de reparación
- Costos de pérdida de producción
- El potencial de daño a las máquinas del resto del proceso.

Para la toma de decisiones, para la recomendación del estado de los rodamientos serán basadas en la tabla de severidad de SKF y se tomará en cuenta la experiencia de motores similares y su importancia dentro del proceso.

3.2. Consideraciones para la correcta colección de datos para el análisis.

Para la correcta colección de datos se requiere conocer los criterios para obtener información y realizar un diagnóstico son los siguientes:

- Conocer el objetivo: El objetivo de la toma de datos es dar un diagnóstico del estado de los rodamientos.
- Saber que datos se desean registrar: Lo que se desea registrar en este trabajo es los espectros de rodamientos y sus frecuencias de fallas características.
- Conocer los resultados esperados: Los resultados esperados son las frecuencias de fallas características de los rodamientos.
- Considerar si se permite realizar las pruebas: Se tiene acceso a los puntos de medición de todos los motores a monitorear.

- Programar: De acuerdo a los niveles de severidad de los resultados se programa la frecuencia de colección de datos o alguna acción de mantenimiento o cambio.

3.3. Determinación de los equipos más importantes

Para la determinar de la importancia de los equipos del Laboratorio de Procesos se consideran dos factores importantes:

- La frecuencia de falla: Para este trabajo, la frecuencia de las fallas se realizará con la experiencia obtenida en motores eléctricos parecidos, que después con la data obtenida a través del tiempo se puede modificar.
- Consecuencia de su aparición: Se evaluará el impacto que tiene el motor sobre la operación, su flexibilidad para operar de acuerdo a los niveles de severidad, el costo de mantenimiento y el impacto en seguridad y ambiente.

Para tener los valores de la importancia de los motores eléctricos de las máquinas seleccionadas en el Laboratorio de Procesos, se desarrollará los valores individuales de los factores principales que son la frecuencia de fallas y las consecuencias, con estos factores se evaluara la importancia que tienen los motores en las cuales será de tres niveles que son los siguiente:

- Importantes (I)
- Importancia Media (IM)
- No Importante (NI)

En la Figura 3.1 se presenta la matriz para la evaluación de la importancia de las máquinas.

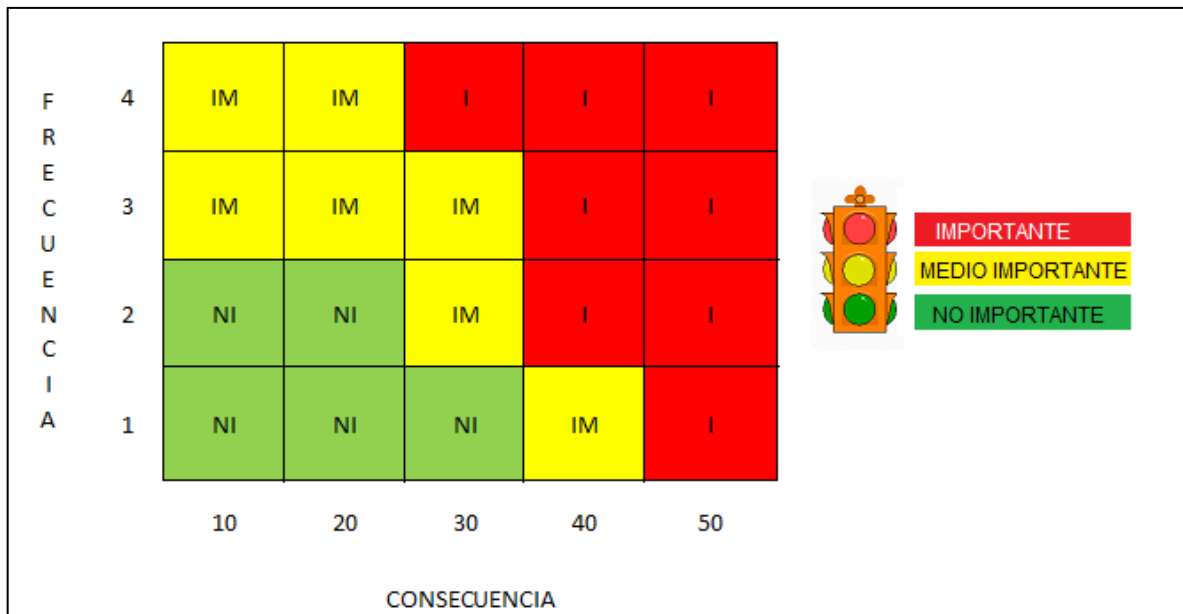


Figura 3. 1: Matriz de Importancia de las máquinas

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 3.1, están los criterios para evaluar las máquinas, para los costos de mantenimiento se tiene como valor base de 1000 soles.

Tabla 3. 1: Criterios de evaluación

| Criterios de Importancia | Cuantificación |
|--|-----------------------|
| 1. Frecuencia de Falla: | |
| Mayor a 2 fallas por año | 4 |
| Entre 1 a 2 fallas al año | 3 |
| Menor a 1 falla por año | 2 |
| Menor a 1 falla por 2 años | 1 |
| 2. Impacto Operacional | |
| Parada inmediata de todo el proceso | 10 |
| Impacto en las practicas | 6 |
| Impacto en las practicas parcialmente | 4 |
| No genera impacto | 1 |
| 3. Flexibilidad operacional | |
| No existe opción de producción y no hay repuesto | 4 |
| Hay opcion de repuesto limitado | 2 |
| Función de repuesto disponible | 1 |
| 4. Costo de mantenimiento | |
| Costos altos | 2 |
| Costos bajos | 1 |
| 5. Impacto en Seguridad | |
| Afecta la seguridad humana | 8 |
| Afecta el ambiente | 6 |
| Afecta las instalaciones | 4 |
| Provoca daños menores | 2 |
| Provoca impactos ambientales que no viola normas | 1 |
| No provoca ningún tipo de daños a personas ni ambiente | 0 |

Fuente: [Matriz de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Confiabilidad operacional, 2008]

Las fórmulas utilizadas para la evaluación de la importancia son las siguientes:

Fórmula 3.1: Ecuación de Importancia

$$\text{Importancia} = \text{Frecuencia de Falla} \times \text{Consecuencia}$$

Fuente: [Matriz de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Confiabilidad operacional, 2008]

Fórmula 3.2: Frecuencia de fallas

$$\text{Frecuencia de Fallas} = \text{Número de Fallas en un año}$$

Fuente: [Matriz de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Confiabilidad operacional, 2008]

Fórmula 3.3: Ecuación de Consecuencia

$$\text{Importancia} = \text{Frecuencia de Falla} \times \text{Consecuencia}$$

Fuente: [Matriz de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Confiabilidad operacional, 2008]

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.2, son el resultado de las evaluaciones obtenidas en las máquinas seleccionadas en el laboratorio de Procesos, en el cual se distingue claramente la importancia de cada una.

Tabla 3. 2: Análisis de Importancia

| Análisis de Importancia | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|------------|----|----|----|----|------|--------------|-----|---------------|--|
| Item | Equipo | Num. Serie | FF | IO | FO | CM | ISAH | Consecuencia | IMP | Categoría | |
| 1 | Taladro Pedestal 1 | AG32 | 2 | 4 | 2 | 1 | 0 | 9 | 18 | No importante | |
| 2 | Taladro Pedestal 2 | R3110 | 2 | 4 | 2 | 1 | 0 | 9 | 18 | No importante | |
| 3 | Taladro Pedestal 3 | R3118 | 2 | 4 | 2 | 1 | 0 | 9 | 18 | No importante | |
| 4 | Taladro Pedestal 4 | R3119 | 2 | 4 | 2 | 1 | 0 | 9 | 18 | No importante | |
| 5 | Brabender | 10171 | 2 | 10 | 2 | 1 | 0 | 21 | 42 | Importante | |

Fuente: [Elaboración Propia]

Se determinó que el equipo más importante es el brabender; ya que, es una máquina única que para todo el proceso de las prácticas. Los taladros son equipos que están en paralelo que al parar uno de ellos no influencia en el desarrollo de las prácticas.

3.4. Toma de decisiones respecto a los datos obtenidos.

Para la toma de decisión, para la acción que se hará después de dar un diagnostico se tiene varios aspectos para hacerlo como: información en base de la experiencia, la tendencia de los valores globales, las frecuencias de falla y sus armónicos y por último la importancia de los equipos en el proceso.

De acuerdo a la experiencia en análisis de vibraciones, se puede presentar un cuadro de cuáles son los componentes del rodamiento que tienen prioridad para seguimiento y/o programar un cambio. De acuerdo a los criterios tenemos lo siguiente:

- En elementos rodantes: Estos cuando presentan una falla incipiente con el valor global entre 1.5.0 a 3.0 gE y su tendencia empieza a

incrementar levemente, el rodamiento se encuentra en advertencia; por lo cual, se le debe realizar una inspección disminuyendo la frecuencia de monitoreo para evaluar el comportamiento de la tendencia de los valores globales. En cuanto al espectro, mientras más armónicos se tenga de la frecuencia característica de BSF, más elementos rodantes están desgastados o presentan un deterioro. Las fallas de los elementos rodantes son consideradas por experiencia como críticas; ya que, el deterioro de un elemento rodante puede ser la causa de fallas tanto en la pista externa como en la pista interna por lo que tiene que estar en constante monitoreo. Cuando empieza a elevarse el valor global, incrementar la tendencia y los números de armónicos de la frecuencia de falla característica, evidencia que la falla incipiente se está aumentando. Cuando el valor global de la medición supere los 3.0 gE, en el espectro es posible que aparezcan otras fallas características de los rodamientos, se debe programar el cambio del rodamiento.

- En pista externa: Estos cuando presentan una falla incipiente con el valor global entre 2.0 a 4.0 gE y su tendencia empieza a incrementar levemente, la pista externa se encuentra en advertencia; por lo cual, se le debe realizar una inspección disminuyendo la frecuencia de monitoreo para evaluar el comportamiento de la tendencia de los valores globales. El espectro indica que mientras más armónicos se tenga de la frecuencia característica de BPFO, la pista externa se encuentra desgastada.

Cuando empieza a elevarse el valor global, incrementar la tendencia y los números de armónicos de la frecuencia de falla característica, evidencia que la falla incipiente se está aumentando. Cuando el

valor global de la medición supere los 4.0 gE, se debe programar el cambio del rodamiento.

- En pista interna: Estos cuando presentan una falla incipiente con el valor global entre 2.0 a 4.0 gE y su tendencia empieza a incrementar levemente, la pista interna se encuentra en advertencia; por lo cual, se le debe realizar una inspección disminuyendo la frecuencia de monitoreo para evaluar el comportamiento de la tendencia de los valores globales. El espectro indica que mientras más armónicos se tenga de la frecuencia característica de BPFI, la pista interna se encuentra desgastada.

Cuando empieza a elevarse el valor global, incrementar la tendencia y los números de armónicos de la frecuencia de falla característica, evidencia que la falla incipiente se está aumentando. Cuando el valor global de la medición supere los 4.0 gE, se debe programar el cambio del rodamiento.

- En canastilla: Estos cuando presentan una falla incipiente con el valor global entre 1.0 a 2.5 gE y su tendencia incrementa, la canastilla se encuentra en advertencia; por lo cual, se le debe realizar una inspección disminuyendo la frecuencia de monitoreo para evaluar el comportamiento de la tendencia de los valores globales. La falla que se presenta en la canastilla es considerable porque debido a esta falla se puede tener una falla catastrófica e inesperada; ya que, el elemento rodante puede salir de su ubicación y generar una parada inesperada.

Cuando empieza a incrementar ligeramente el valor global, incrementar la tendencia y los números de armónicos de la

frecuencia de falla característica, se debe de programar el cambio lo más pronto posible cuando su valor global supere los 2.5 gE.

Para que en el tiempo la toma de decisiones sea mejor se deberá realizar un análisis de causa raíz a los rodamientos dañados, para evaluar hasta que nivel de vibración se pueden llegar a operar. Además, con este estudio de análisis de causa raíz se tiene que tener en consideración la importancia que tienen los motores en el laboratorio para evaluar el nivel en el cual se debe realizar el cambio del rodamiento.

4. ANÁLISIS VIBRACIONAL EN LOS EQUIPOS DEL TALLER DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

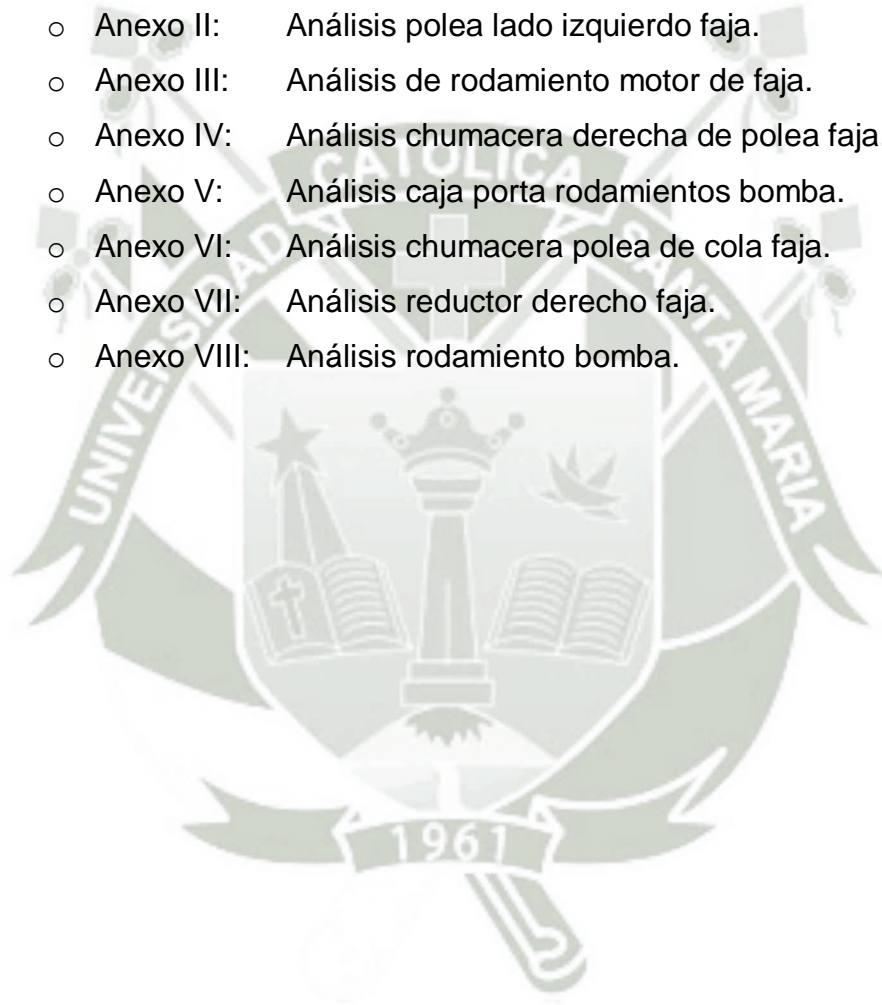
4.1. Introducción

Este capítulo es el más importante en el desarrollo de este trabajo; ya que aquí, se pondrá en práctica todo lo descrito en la teoría y se desarrollará el proceso de análisis vibracional en máquinas rotativas de la Universidad Católica de Santa María, básicamente el análisis en los rodamientos de los equipos. La idea es analizar los datos obtenidos en la colección y dar un diagnóstico del estado de los rodamientos, teniendo en cuenta los valores máximos de vibración en los rodamientos y las frecuencias de fallas que existen en estas.

Para esto primero se debe ubicar los equipos a monitorear y los puntos en los que se va a coleccionar la data. Luego se debe obtener los datos de la placa de los motores, se colecciona la data y se procede a dar un diagnóstico.

En los anexos siguientes se aprecian los siguientes modos de fallo:

- Anexo I: Análisis de reductor de bomba.
- Anexo II: Análisis polea lado izquierdo faja.
- Anexo III: Análisis de rodamiento motor de faja.
- Anexo IV: Análisis chumacera derecha de polea faja.
- Anexo V: Análisis caja porta rodamientos bomba.
- Anexo VI: Análisis chumacera polea de cola faja.
- Anexo VII: Análisis reductor derecho faja.
- Anexo VIII: Análisis rodamiento bomba.



4.2. Taladro de Pedestal AG32

4.2.1. Descripción

Un taladro de pedestal es una máquina que tiene como principal objetivo realizar un agujero. El taladro está compuesto por una base que sostiene una columna, esta columna a la vez sostiene una mesa. La pieza a realizar el agujero, se puede mantener en la mesa con una morsa o con una abrazadera de amarre o la mesa puede girarse fuera del camino para permitir que las piezas altas sean sostenidas directamente en la base. La altura de la mesa puede ajustarse con una manivela para poder nivelarla a la altura de trabajo que se requiera. La columna también aguanta una cabeza que contiene el motor. El motor del taladro hace girar el eje a una velocidad controlada, el eje tiene un manguito porta broca para sostener las herramientas de corte. El eje se mueve con una manivela o palanca de arriba hacia abajo para realizar el agujero.



Figura 4. 1: Vista general Taladro AG 32

Fuente: [Elaboración propia]

Datos de Placa:

Tabla 4. 1: Datos de Placa Taladro AG32

| Motor Taladro AG32 | |
|---------------------------|-------------|
| Tipo | Y90L – 4 |
| Potencia | 1.5 KW |
| Voltaje | 220 / 480 V |
| Frecuencia | 60 HZ |
| Corriente | 6.3 A |
| Velocidad | 1400 RPM |
| Protección | IP 44 |

Fuente: [Elaboración propia]

4.2.1.1. Selección de Rodamiento

El motor del taladro AG32, en los datos de placa no especifica el número de rodamiento que usa; por lo tanto, se seleccionará los rodamientos del motor con el tamaño de la carcasa que se tiene en los datos de placa.

En la tabla del Anexo XI se ingresa con el dato de tamaño de carcasa que para este caso es de 90L y se tiene como resultado que este motor usa un rodamiento 6205 2Z.

En el Anexo X, se tiene las características de los rodamientos 6205 2Z, la Tabla 4.2 contiene las características principales del rodamiento seleccionado.

Tabla 4. 2: Características Rodamiento 6205

| Características Rodamiento 6205 2Z | |
|---|------------|
| Número de Bolas | 9 unidades |
| Ángulo de contacto | 0° |
| Diámetro exterior | 52 mm |
| Diámetro interior | 46.3 mm |
| Velocidad Aprox. De trabajo | 1730 RPM |

Fuente: [Elaboración propia]

4.2.2. Situación Actual del equipo

El taladro AG32 se encuentra ubicado en el Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica de Santa María, este equipo es usado por los alumnos para las prácticas de Procesos de Manufactura y en otras operaciones.

Para realizar el agujero al material con las brocas respectivas, el eje del taladro es accionado por un motor eléctrico de 1.5 KW de potencia, el equipo trabaja con una fuente de voltaje de 220 / 480 V de manera intermitente, usado entre 2 a 3 horas diarias.

De acuerdo a la inspección inicial del motor, este se encuentra operativo, funciona correctamente durante el arranque y parada, no presenta ruidos extraños en el rodamiento tanto del lado libre como en el lado acople y tiene buenas condiciones de trabajo. No se tiene

información de que se haya realizado algún mantenimiento a este motor y no tiene data histórica de toma y análisis de vibraciones anteriores.

Al no tener un mantenimiento ni toma de vibraciones en este motor, este tiene incertidumbre del estado de funcionamiento de los rodamientos. Por lo tanto, se realiza la inspección por análisis vibracional al motor del taladro. Se realizará el análisis en el lado acople y lado libre, para ver el estado de los rodamientos del motor.

4.2.3. Configuración para la colección de datos

Para la colección de datos adecuados, lo primero en realizar es seleccionar los puntos en donde se realizará la toma de datos; en este caso, se analiza solo el estado de los rodamientos y se seleccionará los puntos adecuados para esta medición. Para el análisis de los rodamientos se utilizará la técnica de modulación, la cual la posición del sensor es radial. Por lo que, la toma de datos se realizará en el lado acople en posición radial y en el lado libre en posición radial como se muestra en la Figura 4.2, para conocer el estado del rodamiento.



Figura 4. 2: Puntos de medición del motor de taladro AG 32

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 4.3 se encuentra la especificación de los puntos de medición en el motor y en el equipo de medición.

Tabla 4. 3: Posición de colección de datos

| Posición | Ubicación en Motor | Designación | Configuración en el Equipo medición |
|----------|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Lado Acople | In Board | AG32-IR |
| 2 | Lado Libre | Out board | AG32-OR |

Fuente: [Elaboración propia]

Los datos que se introducen en el equipo de medición de vibraciones son los siguientes:

- Canal: el puerto del equipo de medición, en el cual se conecta el cable más el sensor de medición.

- Sensor: Tipo de sensor que se usara.
- Señal: Gráfica que se mostrará en la pantalla.
- Unidad eje Y: En que unidades se requiere en el eje Y.
- Banda gE: Filtro paso alto o filtro de envolvente
- Rango de Frecuencia: El rango de amplitud máximo esperado.
- Detección: Tipo de detección para fines de visualización.
- Número de líneas: Resolución de la medición.

Se utiliza la Tabla 4.4 para seleccionar la Banda de frecuencia, el filtro pasa alto, el número de promedios y el número de líneas de resolución. Estos valores son los recomendados para la configuración del equipo de colección de datos ingresando con la velocidad de giro del motor que en este caso está en el rango de 250 a 5 000 RPM.

Tabla 4. 4: Selección de datos para configuración

| Velocidad (RPM) | Banda de Frecuencia | Filtro pasa Alto | Número de promedio | Min. Líneas |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 0 - 50 | 5 a 100 Hz | 500 Hz. | 1 | 800 |
| 25 – 500 | 50 – 1 000 Hz | 1000 Hz. | 1 | 800 |
| 250 - 5000 | 500 – 10 000 Hz | 2000 Hz. | 1 | 1600 |
| 4001-en adelante | 5 000 a 40 000 Hz | 5000 Hz. | 1 | 1600 |

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

La configuración del equipo de la colección para este motor será la que se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4. 5: Configuración del Equipo de Colección de datos

| Configuración de Equipo SKF Micrologig Analyzer GX | |
|---|-------------|
| Canal de medición | CH1 |
| Sensor | CMSS 2111 |
| Ver Señal | Espectro |
| Unidad eje Y | gE |
| Banda gE | 500 - 10KHz |
| Rango frecuencias | 2000 Hz |
| Detección | RMS |
| Líneas | 1600 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.2.4. Colección de datos.

La colección de datos es importante dentro del análisis vibracional a los rodamientos de los motores, una mala toma de datos puede ser determinante y dar fallas erróneas. Por lo tanto, es importante usar el sensor indicado y el método de acople.

Para la colección de datos se usa un sensor CMSS 2111 de las cuales sus características se encuentran en la Tabla 4.6. Se usará con acople magnético debido a que es un sensor temporal que solo será usado para toma específica y tiene fácil acceso para la toma de datos.

Tabla 4. 6: Características sensor CMSS 2111

| Características Sensor CMSS 2111 | |
|----------------------------------|--------------|
| Sensor | Acelerómetro |
| Número de serie | P164036 |
| Marca | SKF |
| Acople | Magnético |

Fuente: [Elaboración Propia]

En la Figura 4.3 se observa la colección de datos del lado libre del motor, de igual manera se debe colocar en el lado acople. El sensor debe estar ubicado en una zona maciza del motor y no en la carcasa para que los datos obtenidos sean los más acertados posibles.

**Figura 4. 3:** Ubicación del sensor en el taladro AG32**Fuente:** [Elaboración Propia]

4.2.5. Análisis de los resultados

El análisis de los espectros de los rodamientos proporciona información de la evaluación del estado, donde se analiza tanto la amplitud global del espectro, la tendencia de la amplitud global y las frecuencias de fallas de los rodamientos que son: frecuencia de falla de pista externa (BPFO), frecuencia de falla de pista interna (BPFI), frecuencia de falla de canastilla (FTF) y frecuencia de falla de las bolas (BSF), estos valores de las constantes de frecuencia de falla se encuentran en el Anexo IX.

4.2.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia.

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado acople (In Board) del motor se muestra en la Figura 4.4.

El valor global de la última medición es de 0.16 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado acople tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

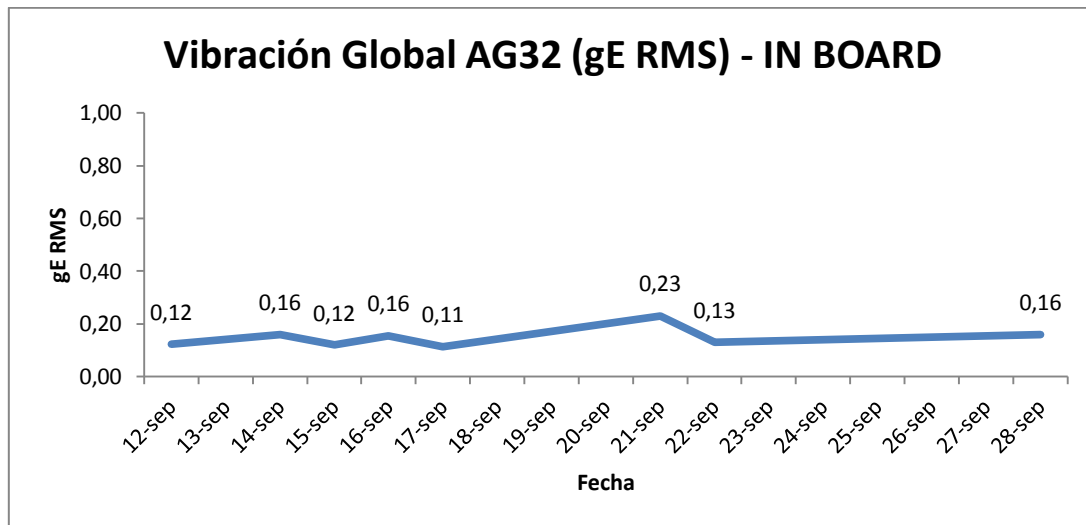


Figura 4. 4: Tendencia de valor Global lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado libre (Out Board) del motor, se muestra en la Figura 4.5.

El valor global de la última medición es de 0.11 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado libre tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

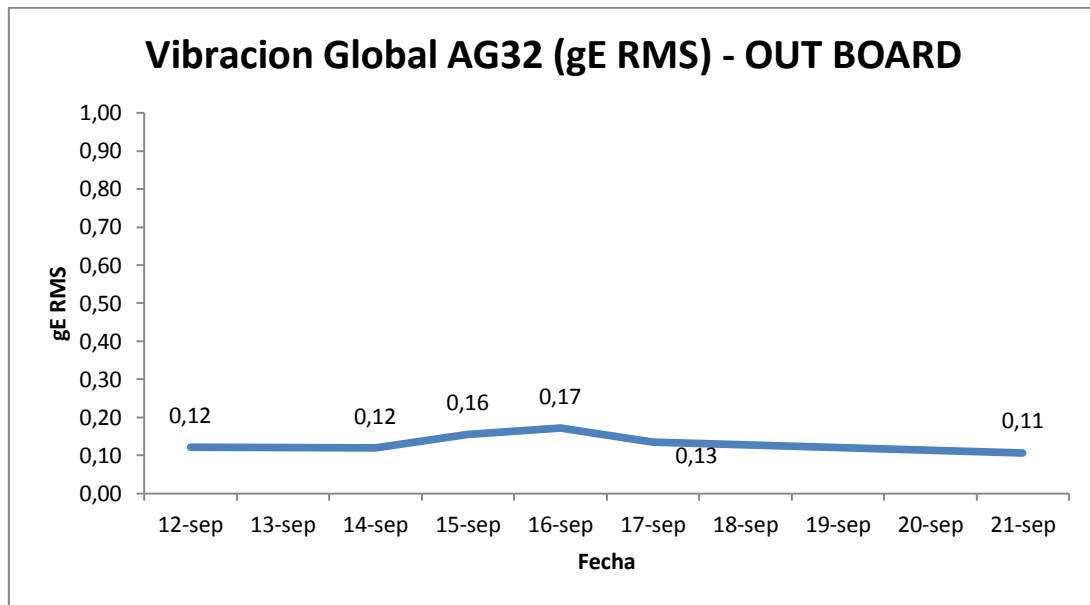


Figura 4. 5: Tendencia de valor Global lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.2.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos

Según la Tabla 4.7 de constantes de frecuencia de fallas del rodamiento 6205, se selecciona la constante del componente del rodamiento que se quiere analizar. La constante se multiplica por la velocidad de giro del motor o la frecuencia de giro, según las unidades que se utilice para el análisis, en este caso es 60 Hz porque se analiza en las unidades de frecuencia.

Se analizará las frecuencias de fallas y sus armónicos (1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X) y si coinciden con algún pico o picos representativos en el espectro.

Tabla 4. 7: Constantes de fallas rodamiento 6205

| Constantes de Fallas en Rodamiento: 6205 | | | |
|--|------|-----|------|
| BPFO | BPFI | FTF | BSF |
| 3.59 | 5.41 | 0.4 | 2.36 |

Fuente: [Elaboración Propia]

En las figuras desde la Figura 4.6 a la Figura 4.13, están los últimos espectros colectados. En estas se encuentran el análisis de las frecuencias de fallas y armónicos.

El análisis de los componentes del rodamiento, como la pista externa, pista interna, canastilla y bolas sus frecuencias de fallas y armónicos no coinciden con los picos representativos del espectro.

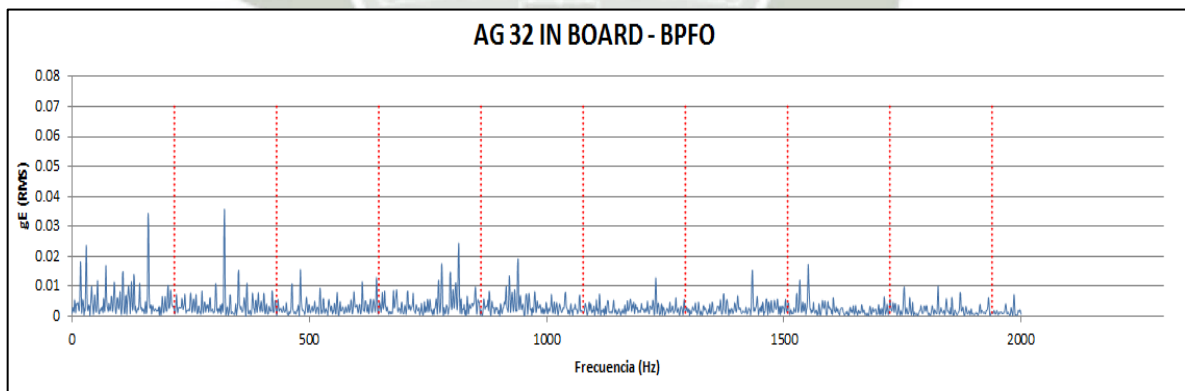


Figura 4. 6: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

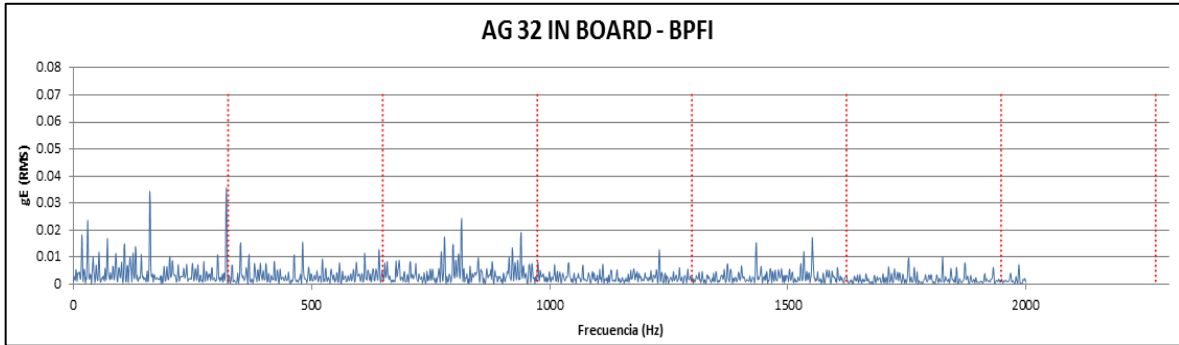


Figura 4. 7: Análisis de espectro de envoltura de pista interna lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

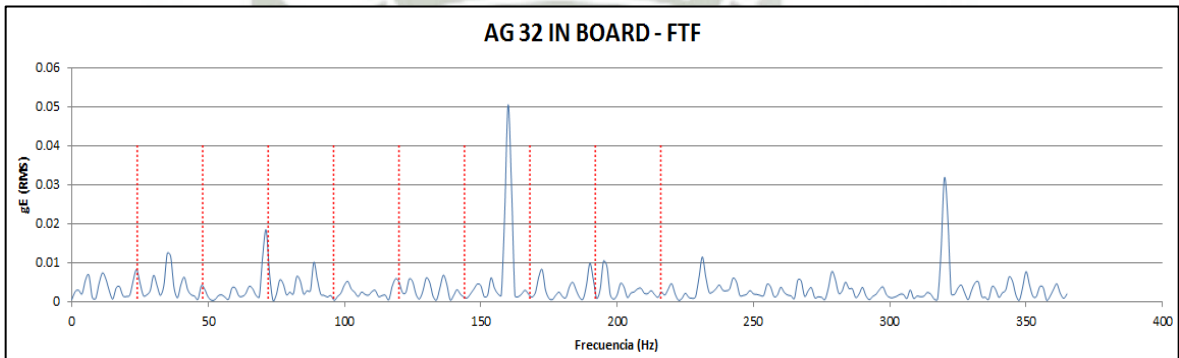


Figura 4. 8: Análisis de espectro de envoltura de canastilla lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

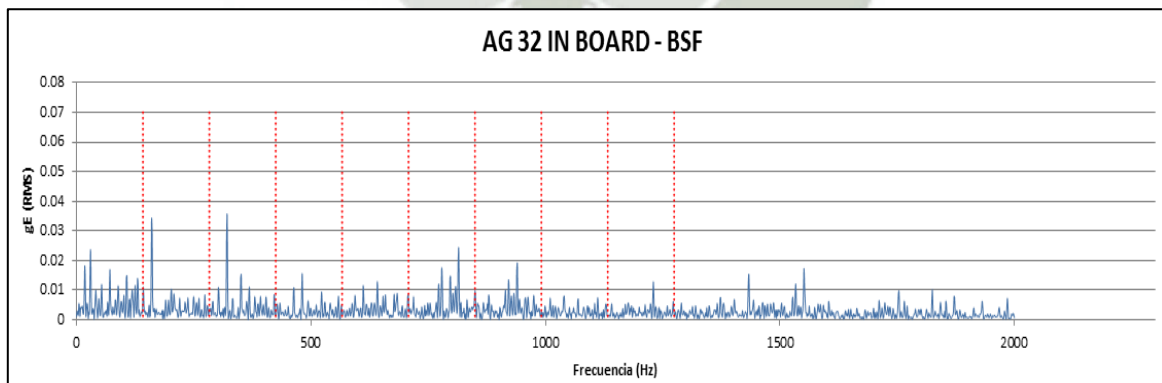


Figura 4. 9: Análisis de espectro de envoltura de bolas lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

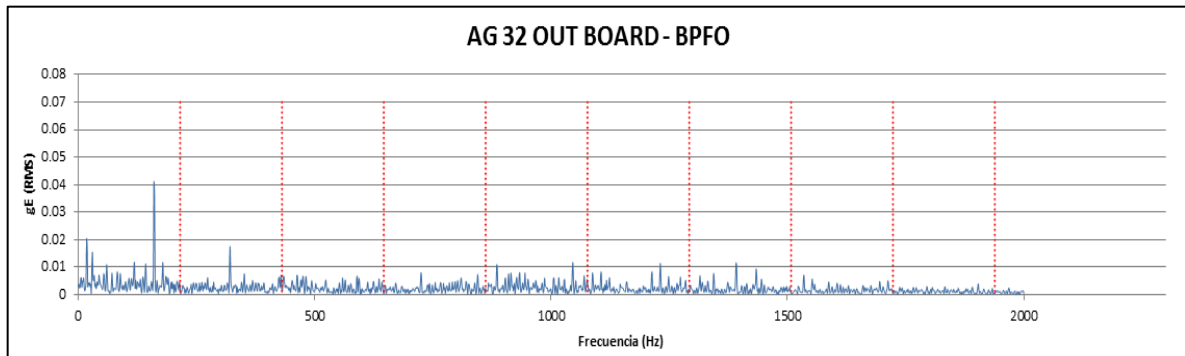


Figura 4. 10: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

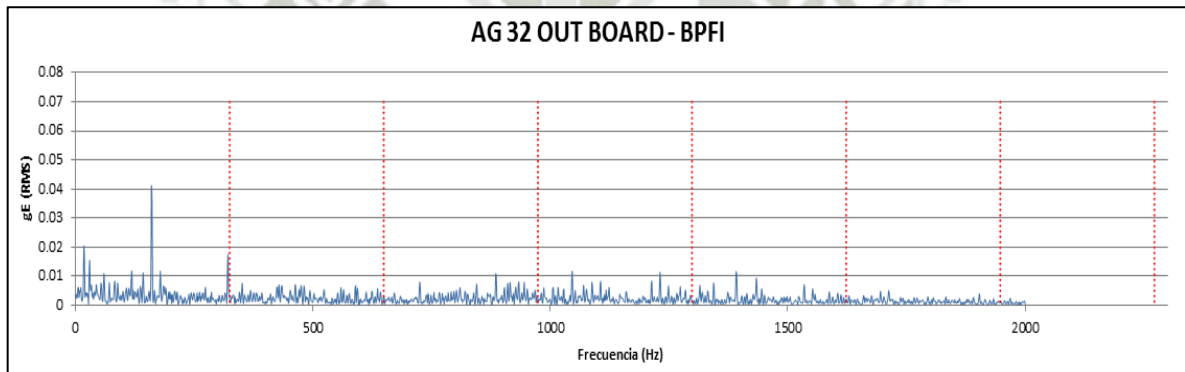


Figura 4. 11: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

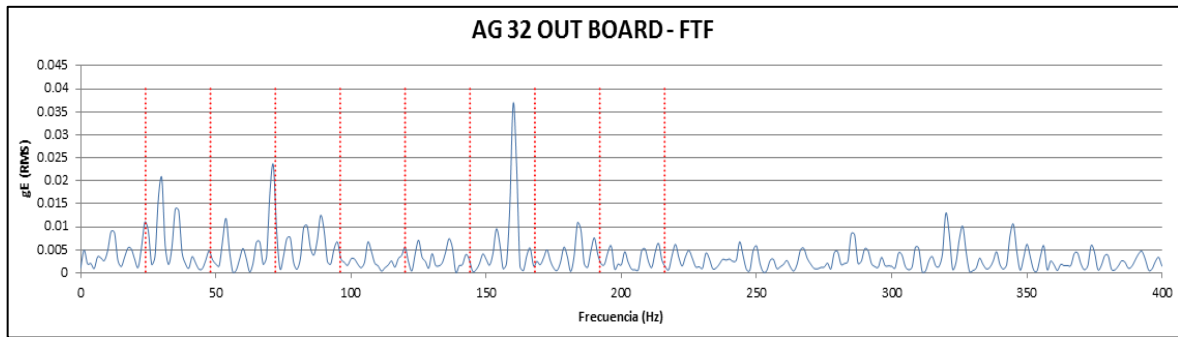


Figura 4. 12: Análisis de espectro de envoltente de canastilla lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

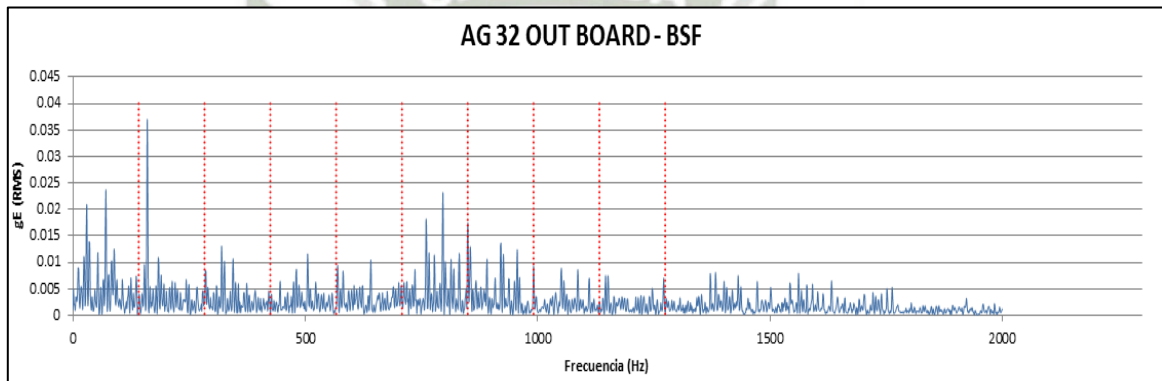


Figura 4. 13: Análisis de espectro de envoltente de bolas lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.2.6. Conclusiones previas

En el análisis de los rodamientos del motor AG32 del Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Los valores globales en gE RMS, medidos tanto en el lado acople como en el lado libre están dentro de lo recomendado.

- Las tendencias de los valores globales con respecto a la fecha de la toma de datos tanto del lado libre como el lado acople, no presenta una variación significativa.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado acople, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado libre, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- El diagnóstico del análisis de las tendencias de valores globales y de las frecuencias de fallas características de los elementos de los rodamientos, es que los rodamientos del lado libre y del lado acople se encuentran en buen estado.



4.3. Taladro de Pedestal R3110

4.3.1. Descripción

Un taladro de pedestal es una máquina que tiene como principal objetivo realizar un agujero. El taladro está compuesto por una base que sostiene una columna, esta columna a la vez sostiene una mesa. La pieza a realizar el agujero, se puede mantener en la mesa con una morsa o con una abrazadera de amarre o la mesa puede girarse fuera del camino para permitir que las piezas altas sean sostenidas directamente en la base. La altura de la mesa puede ajustarse con una manivela para poder nivelarla a la altura de trabajo que se requiera. La columna también aguanta una cabeza que contiene el motor. El motor del taladro hace girar el eje a una velocidad controlada, el eje tiene un manguito porta broca para sostener las herramientas de corte. El eje se mueve con una manivela o palanca de arriba hacia abajo para realizar el agujero.



Figura 4. 14: Vista General Taladro R3110

Fuente: [Elaboración Propia]

Datos de Placa:

Tabla 4. 8: Datos de Placa Taladro R3110

| Motor Taladro R3110 | |
|----------------------------|-------------|
| Tipo | Y90L – 4 |
| Potencia | 1.5 KW |
| Voltaje | 220 / 480 V |
| Frecuencia | 60 HZ |
| Corriente | 8.0 A |
| Velocidad | 1730 RPM |
| Protección | IP 44 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.3.1.1. Selección de Rodamiento

En el motor del taladro R3110, en los datos de placa no especifica el número de rodamiento que usa; por lo tanto, se seleccionará los rodamientos del motor con el tamaño de la carcasa que se tiene en los datos de placa.

En la tabla del Anexo XI, se ingresa con el dato de tamaño de carcasa que para este caso es 90L y se tiene como resultado que este motor usa un rodamiento 6205.

En el Anexo X, se tiene las características de los rodamientos 6205, la Tabla 4.9 contiene las características principales del rodamiento seleccionado.

Tabla 4. 9: Característica rodamiento 6205

| Características Rodamiento 6205 2Z | |
|---|------------|
| Número de Bolas | 9 unidades |
| Ángulo de contacto | 0° |
| Diámetro exterior | 52 mm |
| Diámetro interior | 46.3 mm |
| Velocidad Aprox. De trabajo | 1730 RPM |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.3.2. Situación Actual del equipo

El taladro R3110 se encuentra ubicado en el Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica de Santa María, este

equipo es usado por los alumnos para las prácticas de Procesos de Manufactura y en otras operaciones.

Para realizar el agujero al material con las brocas respectivas, el eje del taladro es accionado por un motor eléctrico de 1.5 KW de potencia, el equipo trabaja con una fuente de voltaje de 220 / 480 V de manera intermitente, usado entre 2 a 3 horas diarias.

De acuerdo a la inspección inicial del motor, este se encuentra operativo, funciona correctamente durante el arranque y parada, no presenta ruidos extraños en el rodamiento tanto del lado libre como en el lado acople y tiene buenas condiciones de trabajo. No se tiene información de que se haya realizado algún mantenimiento a este motor y no tiene data histórica de toma y análisis de vibraciones anteriores.

Al no tener un mantenimiento ni toma de vibraciones en este motor, este tiene incertidumbre del estado de funcionamiento de los rodamientos. Por lo tanto, se realiza la inspección por análisis vibracional al motor del taladro. Se realizará el análisis en el lado acople y lado libre, para ver el estado de los rodamientos del motor.

4.3.3. Configuración para la colección de datos

Para la colección de datos adecuados, lo primero en realizar es seleccionar los puntos en donde se realizará la toma de datos; en este caso, se analiza solo el estado de los rodamientos y se seleccionará los puntos adecuados para esta medición. Para el análisis de los rodamientos se utilizará la técnica de modulación, la cual la posición

del sensor es radial. Por lo que, la toma de datos se realizará en el lado acople en posición radial y en el lado libre en posición radial como se muestra en la Figura 4.15, para conocer el estado del rodamiento



Figura 4. 15: Puntos de medición del motor de taladro R 3110

Fuente: [Elaboración Propia]

En la Tabla 4.10 se encuentra la especificación de los puntos de medición en el motor y en el equipo de medición

Tabla 4. 10: Posición de colección de datos

| Posición | Ubicación en Motor | Designación | Configuración en el Equipo medición |
|----------|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Lado Acople | In Board | R3110-IR |
| 2 | Lado Libre | Out board | R3110-OR |

Fuente: [Elaboración propia]

Los datos que se introducen en el equipo de medición de vibraciones son los siguientes:

- Canal: el puerto del equipo de medición, en el cual se conecta el cable más el sensor de medición.
- Sensor: Tipo de sensor que se usara.
- Señal: Gráfica que se mostrará en la pantalla.
- Unidad eje Y: En que unidades se requiere en el eje Y.
- Banda gE: Filtro paso alto o filtro de envolvente.
- Rango de Frecuencia: El rango de amplitud máximo esperado.
- Detección: Tipo de detección para fines de visualización.
- Número de líneas: Resolución de la medición.

Se utiliza la Tabla 4.11 para seleccionar la Banda de frecuencia, el filtro pasa alto, el número de promedios y el número de líneas de resolución. Estos valores son los recomendados para la configuración del equipo de colección de datos ingresando con la velocidad de giro del motor que en este caso está en el rango de 250 a 5 000 RPM.

Tabla 4. 11: Selección de datos para configuración

| Velocidad (RPM) | Banda de Frecuencia | Filtro pasa Alto | Número de promedio | Min. Líneas |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 0 - 50 | 5 a 100 Hz | 500 Hz. | 1 | 800 |
| 25 – 500 | 50 – 1 000 Hz | 1000 Hz. | 1 | 800 |
| 250 - 5000 | 500 – 10 000 Hz | 2000 Hz. | 1 | 1600 |
| 4001-en adelante | 5 000 a 40 000 Hz | 5000 Hz. | 1 | 1600 |

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

La configuración para este motor será la siguiente.

Tabla 4. 12: Configuración del Equipo de Colección de datos

| Configuración de Equipo SKF Micrologig Analyzer GX | |
|---|-------------|
| Canal de medición | CH1 |
| Sensor | CMSS 2111 |
| Ver Señal | Espectro |
| Unidad eje Y | gE |
| Banda gE | 500 - 10KHz |
| Rango frecuencias | 2000 Hz |
| Detección | RMS |
| Líneas | 1600 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.3.4. Colección de datos.

La colección de datos es importante dentro del análisis vibracional a los rodamientos de los motores, una mala toma de datos puede ser

determinante y dar fallas erróneas. Por lo tanto, es importante usar el sensor indicado y el método de acople.

Para la colección de datos se usa un sensor CMSS 2111 de las cuales sus características se encuentran en la Tabla 4.13. Se usará con acople magnético debido a que es un sensor temporal que solo será usado para toma específica y tiene fácil acceso para la toma de datos.

Tabla 4. 13: Características sensor CMSS 2211

| Características Sensor CMSS 2111 | |
|---|--------------|
| Sensor | Acelerómetro |
| Número de serie | P164036 |
| Marca | SKF |
| Acople | Magnético |

Fuente: [Elaboración Propia]

En la Figura 4.16 se observa la colección de datos del lado acople del motor, de igual manera se debe colocar en el lado libre. El sensor debe estar ubicado en una zona maciza del motor y no en la carcasa para que los datos obtenidos sean los más acertados posibles.



Figura 4. 16: Ubicación del sensor en el taladro R3110

Fuente: [Elaboración Propia]

4.3.5. Análisis de los resultados

El análisis de los espectros de los rodamientos proporciona información de la evaluación del estado, donde se analiza tanto la amplitud global del espectro, la tendencia de la amplitud global y las frecuencias de fallas de los rodamientos que son: frecuencia de falla de pista externa (BPFO), frecuencia de falla de pista interna (BPFI), frecuencia de falla de canastilla (FTF) y frecuencia de falla de las bolas (BSF), estos valores de las constantes de frecuencia de falla se encuentran en el Anexo IX.

4.3.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia.

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado acople (In Board) del motor se muestra en la Figura 4.17.

El valor global de la última medición es de 0.3 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado acople tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

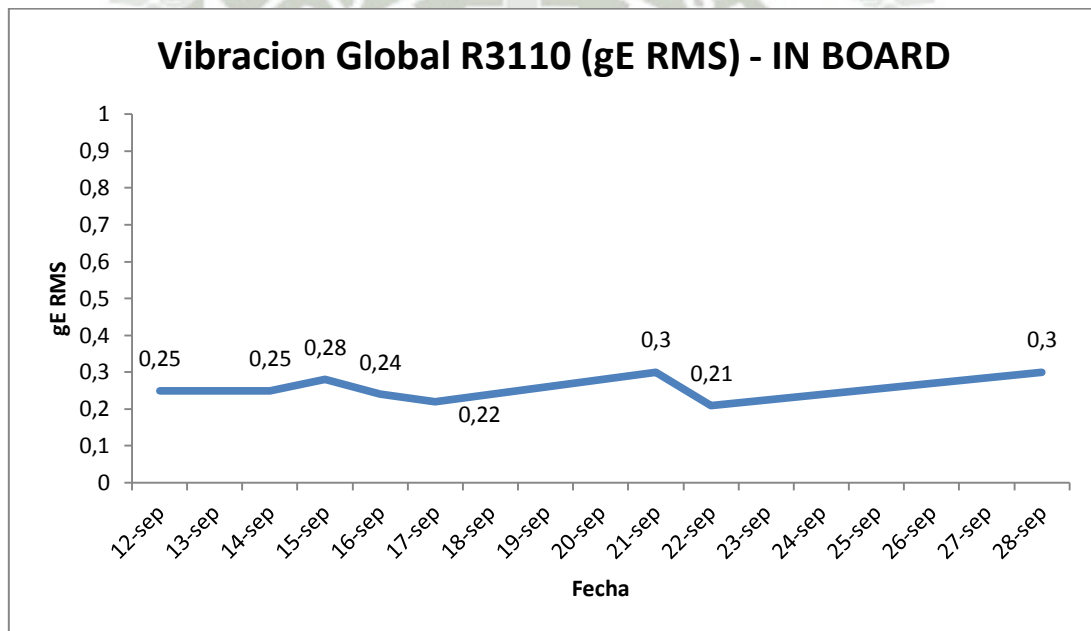


Figura 4. 17: Tendencia de valor Global lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado libre (Out Board) del motor, se muestra en la Figura 4.18.

El valor global de la última medición es de 0.25 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado libre tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

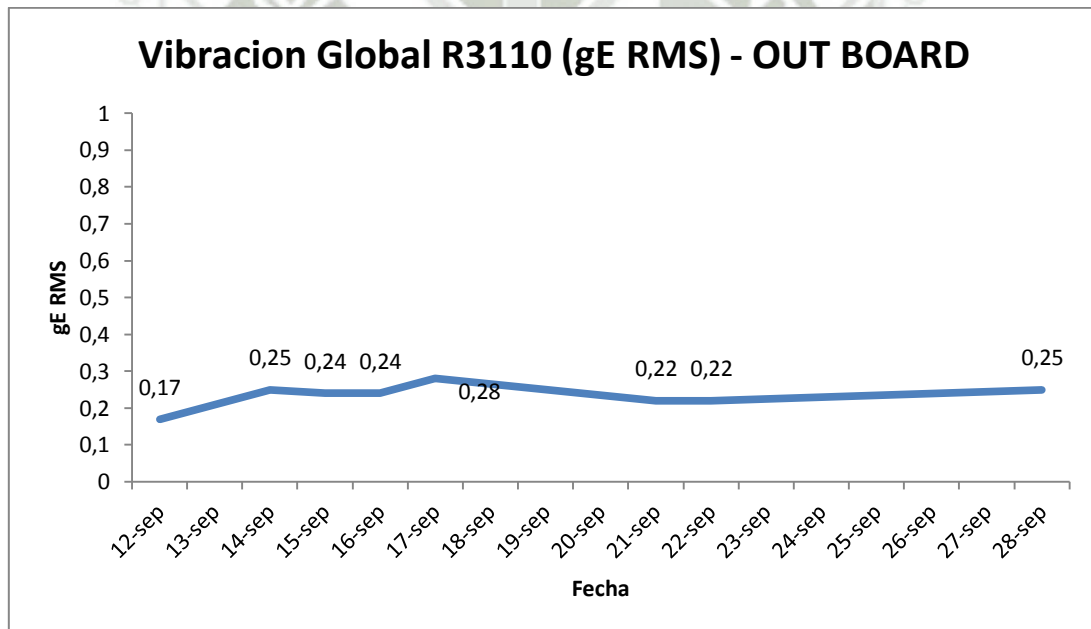


Figura 4. 18: Tendencia de valor Global lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.3.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos

Según la Tabla 4.14 de constantes de frecuencia de fallas del rodamiento 6205, se selecciona la constante del componente del rodamiento que se quiere analizar. La constante se multiplica por la velocidad de giro del motor o la frecuencia de giro, según las unidades que se utilice para el análisis, en este caso es 60 Hz porque se analiza en las unidades de frecuencia.

Se analizará las frecuencias de fallas y sus armónicos (1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X) y si coinciden con algún pico o picos representativos en el espectro.

Tabla 4. 14: Constantes de fallas rodamiento 6205

| Constantes de Fallas en Rodamiento: 6205 | | | |
|--|------|-----|------|
| BPFO | BPMF | FTF | BSF |
| 3.59 | 5.41 | 0.4 | 2.36 |

Fuente: [Elaboración Propia]

En las figuras desde la Figura 4.19 a la Figura 4.26, están los últimos espectros colectados. En estas se encuentran el análisis de las frecuencias de fallas y armónicos.

El análisis de los componentes del rodamiento, como la pista externa, pista interna, canastilla y bolas sus frecuencias de fallas y armónicos no coinciden con los picos representativos del espectro.

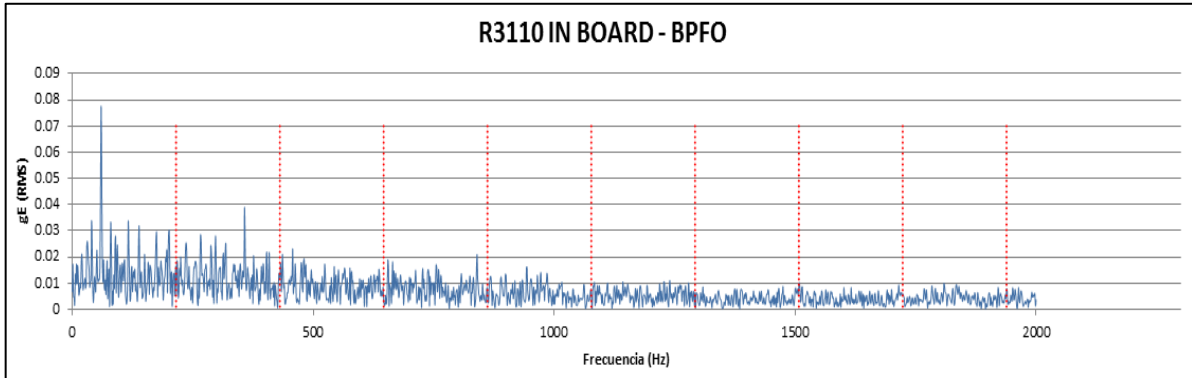


Figura 4. 19: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

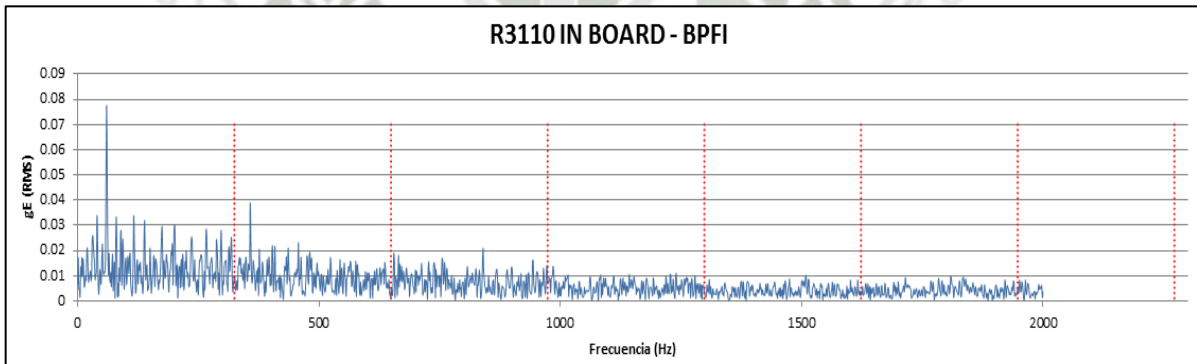


Figura 4. 20: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

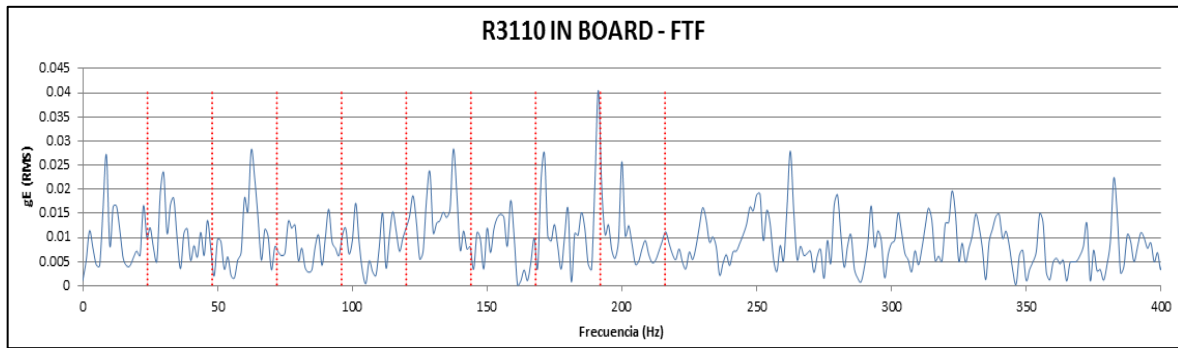


Figura 4. 21: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

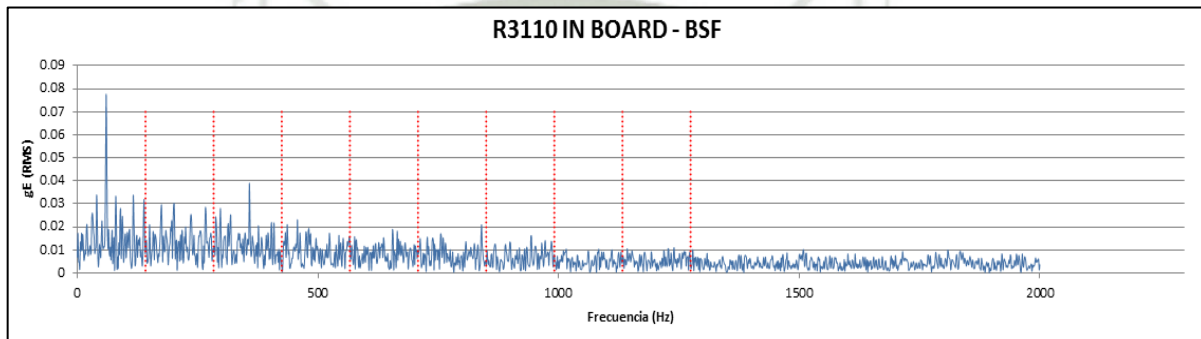


Figura 4. 22: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

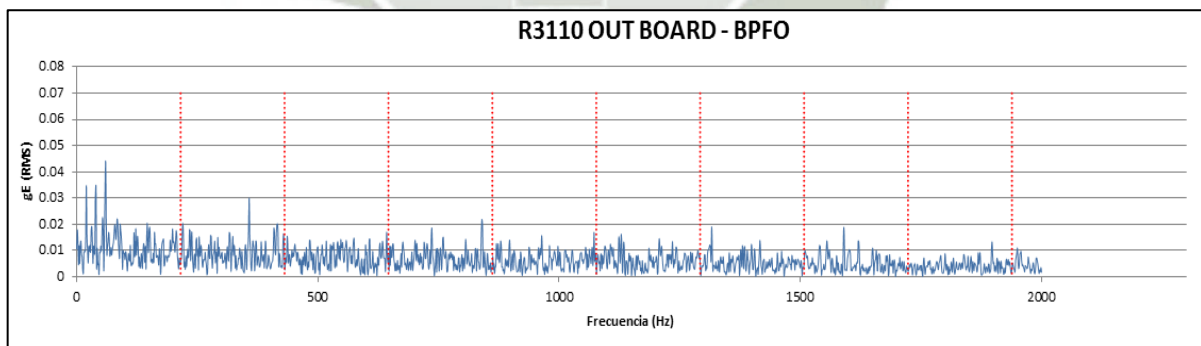


Figura 4. 23: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

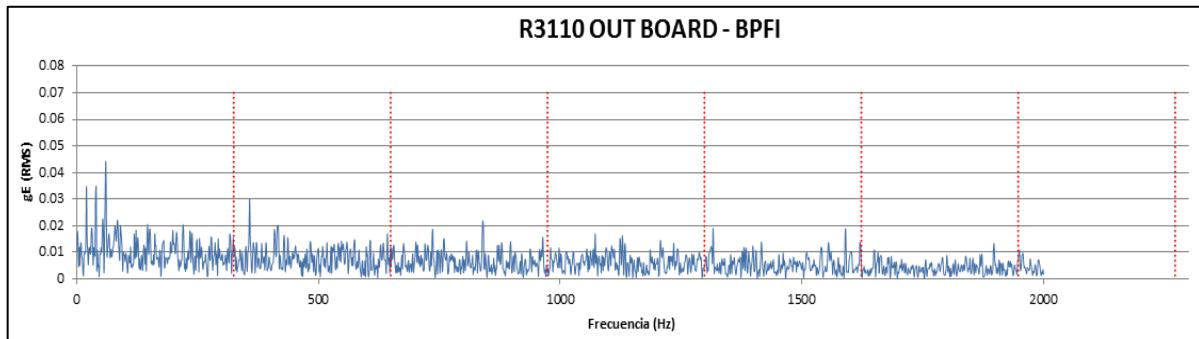


Figura 4. 24: Análisis de espectro de envoltura de pista externa lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

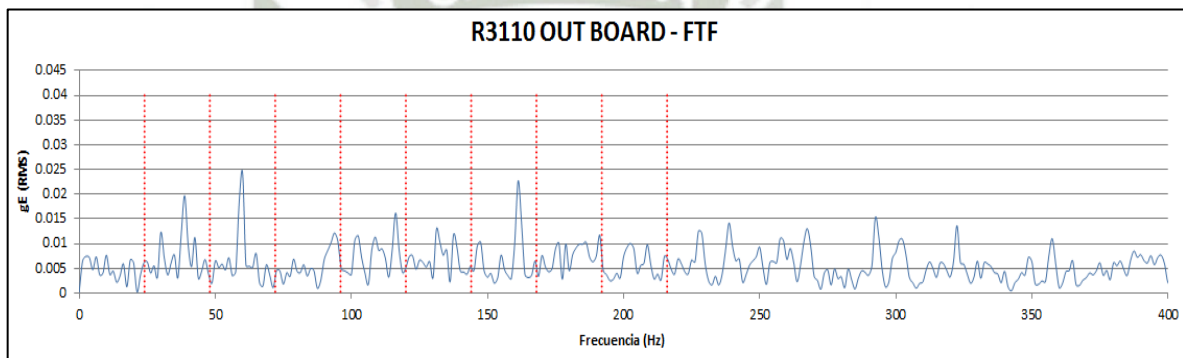


Figura 4. 25: Análisis de espectro de envoltura de canastilla lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

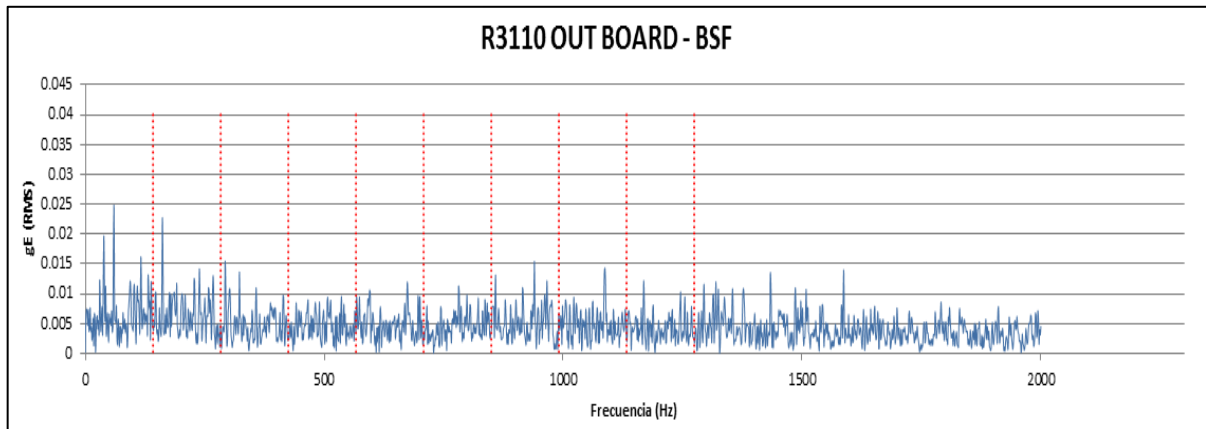


Figura 4. 26: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.3.6. Conclusiones previas

En el análisis de los rodamientos del motor R3110 del Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Los valores globales en gE RMS, medidos tanto en el lado acople como en el lado libre están dentro de lo recomendado.
- Las tendencias de los valores globales con respecto a la fecha de la toma de datos tanto del lado libre como el lado acople, no presenta una variación significativa.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado acople, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado libre, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.

- El diagnóstico del análisis de las tendencias de valores globales y de las frecuencias de fallas características de los elementos de los rodamientos, es que los rodamientos del lado libre y del lado acople se encuentran en buen estado.

4.4. Taladro de Pedestal R3118

4.4.1. Descripción

Un taladro de pedestal es una máquina que tiene como principal objetivo realizar un agujero. El taladro está compuesto por una base que sostiene una columna, esta columna a la vez sostiene una mesa. La pieza a realizar el agujero, se puede mantener en la mesa con una morsa o con una abrazadera de amarre o la mesa puede girarse fuera del camino para permitir que las piezas altas sean sostenidas directamente en la base. La altura de la mesa puede ajustarse con una manivela para poder nivelarla a la altura de trabajo que se requiera. La columna también aguanta una cabeza que contiene el motor. El motor del taladro hace girar el eje a una velocidad controlada, el eje tiene un manguito porta broca para sostener las herramientas de corte. El eje se mueve con una manivela o palanca de arriba hacia abajo para realizar el agujero.



Figura 4. 27: Vista general Taladro R3118

Fuente: [Elaboración Propia]

Datos de Placa:

Tabla 4. 15: Datos de Placa Taladro R3118

| Motor Taladro R3118 | |
|----------------------------|-------------|
| Tipo | Y90L - 4 |
| Potencia | 1.5 KW |
| Voltaje | 220 / 480 V |
| Frecuencia | 60 HZ |
| Corriente | 8.0 A |
| Velocidad | 1730 RPM |
| Protección | IP 44 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.4.1.1. Selección de Rodamiento

El motor del taladro R3118, en los datos de placa no especifica el número de rodamiento que usa; por lo tanto, se seleccionará los rodamientos del motor con el tamaño de la carcasa que se tiene en los datos de placa.

En la tabla del Anexo XI se ingresa con el dato de tamaño de carcasa que para este caso es de 90L y se tiene como resultado que este motor usa un rodamiento 6205 2Z.

En el Anexo X, se tiene las características de los rodamientos 6205 2Z, la Tabla 4.16 contiene las características principales del rodamiento seleccionado.

Tabla 4. 16: Características Rodamiento 6205

| Características Rodamiento 6205 2Z | |
|---|------------|
| Número de Bolas | 9 unidades |
| Ángulo de contacto | 0° |
| Diámetro exterior | 52 mm |
| Diámetro interior | 46.3 mm |
| Velocidad Aprox. De trabajo | 1730 RPM |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.4.2. Situación Actual del equipo

El taladro R3118 se encuentra ubicado en el Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica de Santa María, este equipo es usado por los alumnos para las prácticas de Procesos de Manufactura y en otras operaciones.

Para realizar el agujero al material con las brocas respectivas, el eje del taladro es accionado por un motor eléctrico de 1.5 KW de potencia, el equipo trabaja con una fuente de voltaje de 220 / 480 V de manera intermitente, usado entre 2 a 3 horas diarias.

De acuerdo a la inspección inicial del motor, este se encuentra operativo, funciona correctamente durante el arranque y parada, no presenta ruidos extraños en el rodamiento tanto del lado libre como en el lado acople y tiene buenas condiciones de trabajo. No se tiene información de que se haya realizado algún mantenimiento a este motor y no tiene data histórica de toma y análisis de vibraciones anteriores.

Al no tener un mantenimiento ni toma de vibraciones en este motor, este tiene incertidumbre del estado de funcionamiento de los rodamientos. Por lo tanto, se realiza la inspección por análisis vibracional al motor del taladro. Se realizará el análisis en el lado acople y lado libre, para ver el estado de los rodamientos del motor.

4.4.3. Configuración para la colección de datos

Para la colección de datos adecuados, lo primero en realizar es seleccionar los puntos en donde se realizará la toma de datos; en este

caso, se analiza solo el estado de los rodamientos y se seleccionará los puntos adecuados para esta medición. Para el análisis de los rodamientos se utilizará la técnica de modulación, la cual la posición del sensor es radial. Por lo que, la toma de datos se realizará en el lado acople en posición radial y en el lado libre en posición radial como se muestra en la Figura 4.28, para conocer el estado del rodamiento.



Figura 4. 28: Puntos de medición del motor de taladro R3118

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 4.17 se encuentra la especificación de los puntos de medición en el motor y en el equipo de medición.

Tabla 4. 17: Posición de colección de datos

| Posición | Ubicación en Motor | Designación | Configuración en el Equipo medición |
|----------|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Lado Acople | In Board | R3118-IR |
| 2 | Lado Libre | Out board | R3118-OR |

Fuente: [Elaboración propia]

Los datos que se introducen en el equipo de medición de vibraciones son los siguientes:

- Canal: el puerto del equipo de medición, en el cual se conecta el cable más el sensor de medición.
- Sensor: Tipo de sensor que se usara.
- Señal: Gráfica que se mostrará en la pantalla.
- Unidad eje Y: En que unidades se requiere en el eje Y.
- Banda gE: Filtro paso alto o filtro de envolvente
- Rango de Frecuencia: El rango de amplitud máximo esperado.
- Detección: Tipo de detección para fines de visualización.
- Número de líneas: Resolución de la medición.

Se utiliza la Tabla 4.18 para seleccionar la Banda de frecuencia, el filtro pasa alto, el número de promedios y el número de líneas de resolución. Estos valores son los recomendados para la configuración del equipo de colección de datos ingresando con la velocidad de giro del motor que en este caso está en el rango de 250 a 5 000 RPM.

Tabla 4. 18: Selección de datos para configuración

| Velocidad (RPM) | Banda de Frecuencia | Filtro pasa Alto | Número de promedio | Min. Líneas |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 0 – 50 | 5 a 100 Hz | 500 Hz. | 1 | 800 |
| 25 – 500 | 50 – 1 000 Hz | 1000 Hz. | 1 | 800 |
| 250 – 5000 | 500 – 10 000 Hz | 2000 Hz. | 1 | 1600 |
| 4001-en adelante | 5 000 a 40 000 Hz | 5000 Hz. | 1 | 1600 |

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

La configuración del equipo de la colección para este motor será la la que se muestra en la Tabla 3.19.

Tabla 4. 19: Configuración del Equipo de Colección de datos

| Configuración de Equipo SKF Micrologig Analyzer GX | |
|---|-------------|
| Canal de medición | CH1 |
| Sensor | CMSS 2111 |
| Ver Señal | Espectro |
| Unidad eje Y | gE |
| Banda gE | 500 - 10KHz |
| Rango frecuencias | 2000 Hz |
| Detección | RMS |
| Líneas | 1600 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.4.4. Colección de datos.

La colección de datos es importante dentro del análisis vibracional a los rodamientos de los motores, una mala toma de datos puede ser determinante y dar fallas erróneas. Por lo tanto, es importante usar el sensor indicado y el método de acople.

Para la colección de datos se usa un sensor CMSS 2111 de las cuales sus características se encuentran en la Tabla 4.20. Se usará con acople magnético debido a que es un sensor temporal que solo será usado para toma específica y tiene fácil acceso para la toma de datos.

Tabla 4. 20: Características sensor CMSS 2211

| Características Sensor CMSS 2111 | |
|----------------------------------|--------------|
| Sensor | Acelerómetro |
| Número de serie | P164036 |
| Marca | SKF |
| Acople | Magnético |

Fuente: [Elaboración Propia]

En la Figura 4.29 se observa la colección de datos del lado libre del motor, de igual manera se debe colocar en el lado acople. El sensor debe estar ubicado en una zona maciza del motor y no en la carcasa para que los datos obtenidos sean los más acertados posibles.



Figura 4. 29: Ubicación del sensor en el taladro R3118

Fuente: [Elaboración Propia]

4.4.5. Análisis de los resultados

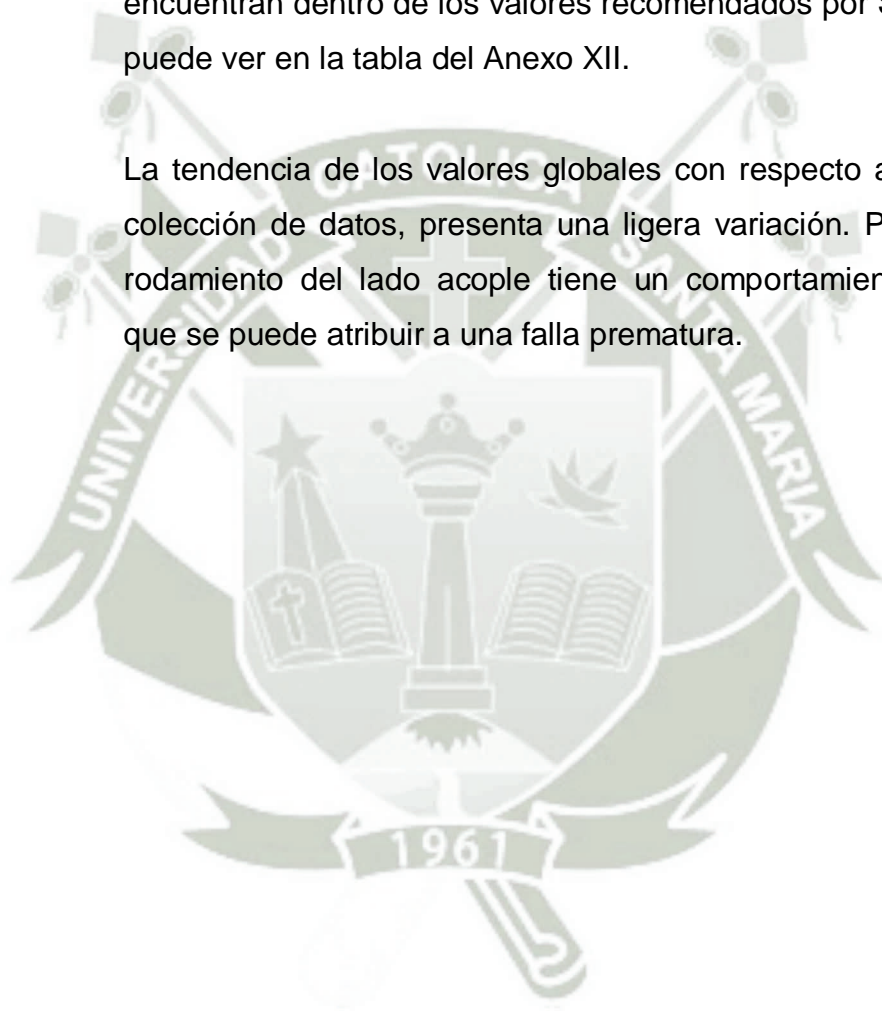
El análisis de los espectros de los rodamientos proporciona información de la evaluación del estado, donde se analiza tanto la amplitud global del espectro, la tendencia de la amplitud global y las frecuencias de fallas de los rodamientos que son: frecuencia de falla de pista externa (BPFO), frecuencia de falla de pista interna (BPFI), frecuencia de falla de canastilla (FTF) y frecuencia de falla de las bolas (BSF), estos valores de las constantes de frecuencia de falla se encuentran en el Anexo IX.

4.4.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia.

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado acople (In Board) del motor se muestra en la Figura 4.30.

El valor global de la última medición es de 0.39 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, presenta una ligera variación. Por lo cual, el rodamiento del lado acople tiene un comportamiento creciente, que se puede atribuir a una falla prematura.



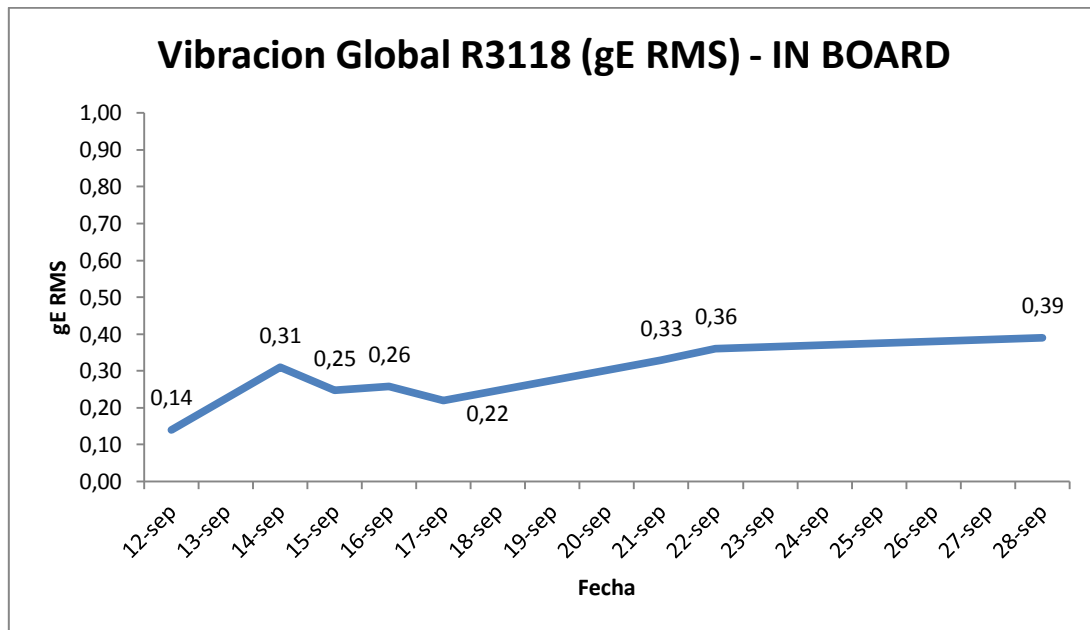


Figura 4. 30: Tendencia de valor Global lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado libre (Out Board) del motor, se muestra en la Figura 4.31.

El valor global de la última medición es de 0.27 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado libre tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

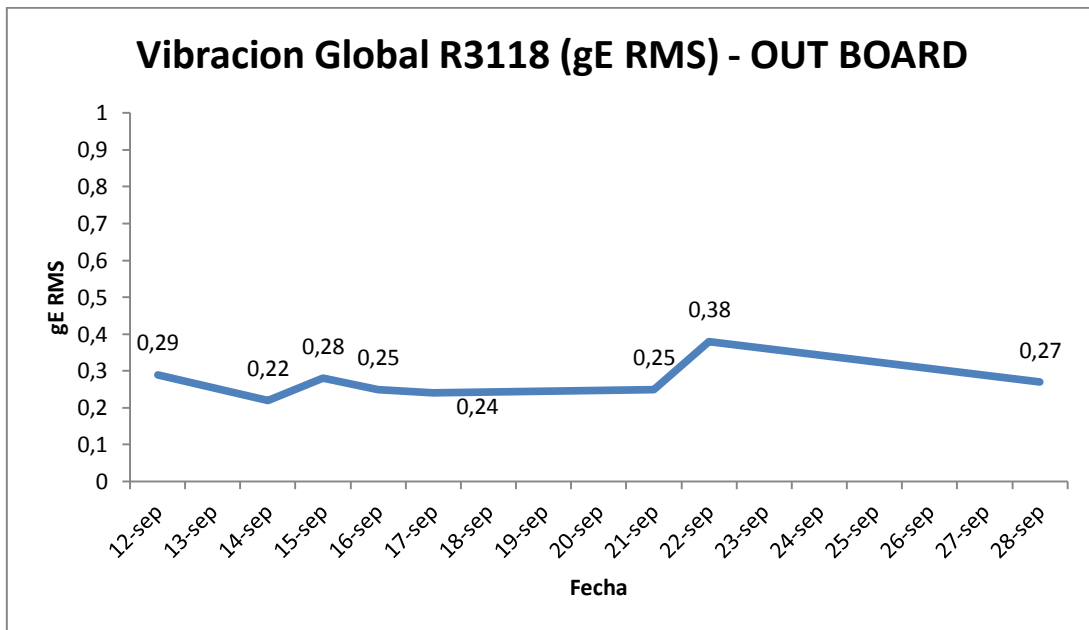


Figura 4. 31: Tendencia de valor Global lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.4.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos

Según la Tabla 4.21 de constantes de frecuencia de fallas del rodamiento 6205, se selecciona la constante del componente del rodamiento que se quiere analizar. La constante se multiplica por la velocidad de giro del motor o la frecuencia de giro, según las unidades que se utilice para el análisis, en este caso es 60 Hz porque se analiza en las unidades de frecuencia.

Se analizará las frecuencias de fallas y sus armónicos (1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X) y si coinciden con algún pico o picos representativos en el espectro.

Tabla 4. 21: Constantes de fallas rodamiento 6205

| Constantes de Fallas en Rodamiento: 6205 | | | |
|--|------|-----|------|
| BPFO | BPFI | FTF | BSF |
| 3.59 | 5.41 | 0.4 | 2.36 |

Fuente: [Elaboración Propia]

En las figuras desde la Figura 4.32 a la Figura 4.39, están los últimos espectros colectados. En estas se encuentran el análisis de las frecuencias de fallas y armónicos.

El análisis de los componentes del rodamiento, como la pista externa, pista interna y canastilla sus frecuencias de fallas y armónicos no coinciden con los picos representativos del espectro. Sin embargo, la frecuencia de falla de bolas en el lado libre y acople coincide con las frecuencias representativas y teniendo armónicos de 1X, 2X, 3X, 4X y 5X, lo que indicaría que la severidad del daño de las bolas del rodamiento es considerable aunque se encuentre dentro del valor recomendado por SKF. Esta es una falla incipiente, que puede ir aumentado su amplitud de valor global y las bolas del rodamiento lado acople se pueden ir deteriorando.

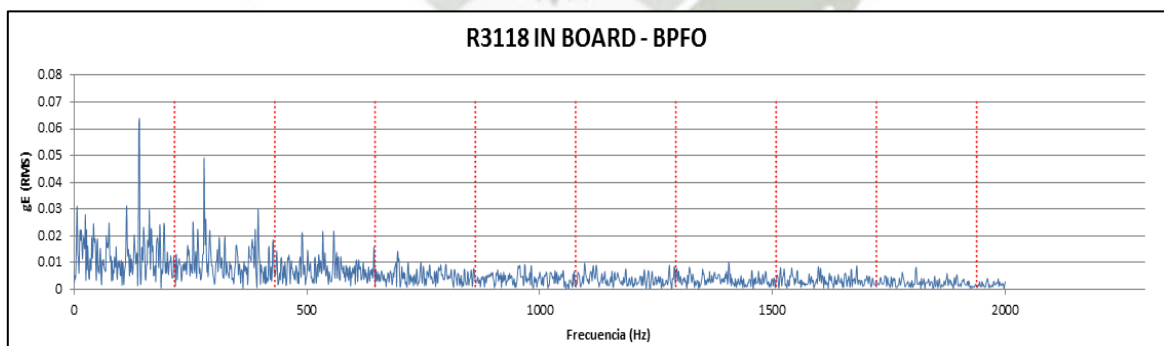


Figura 4. 32: Análisis de espectro de envoltente de pista externa lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

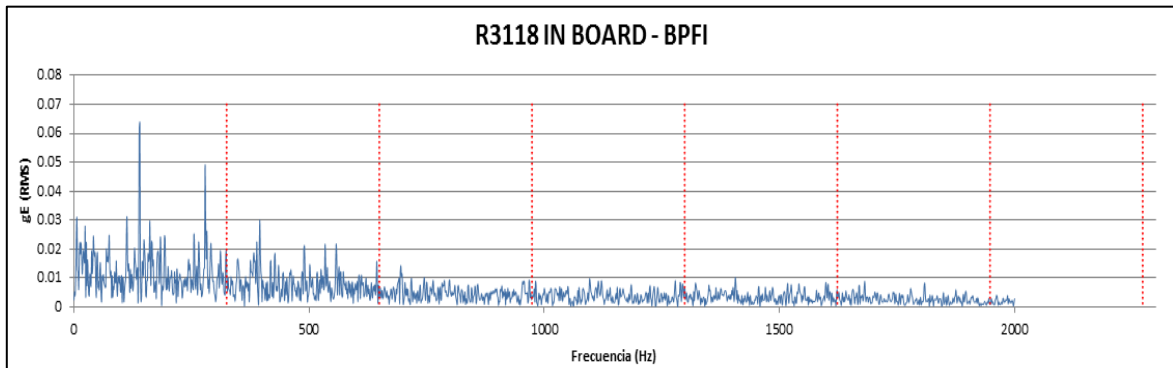


Figura 4. 33: Análisis de espectro de envoltorio de pista interna lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

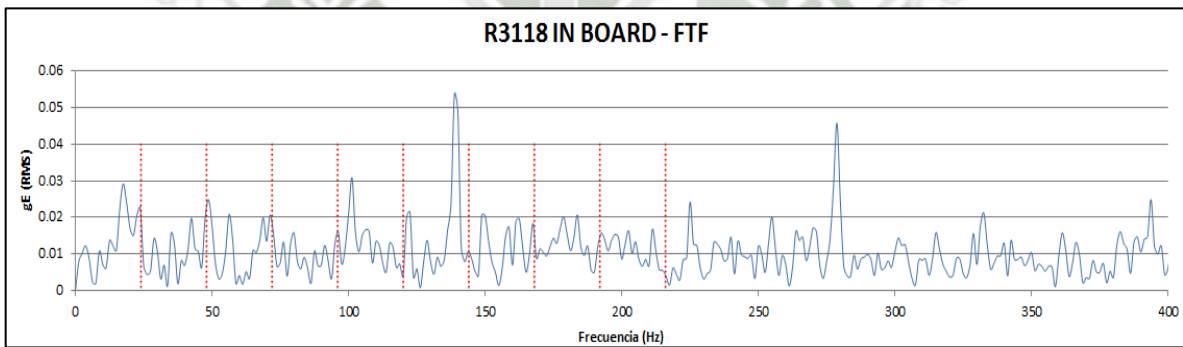


Figura 4. 34: Análisis de espectro de envoltorio de canastilla lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

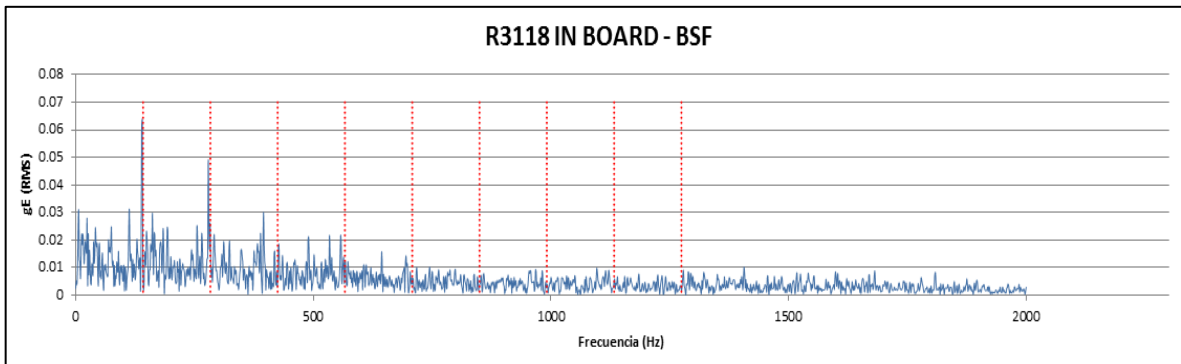


Figura 4. 35: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

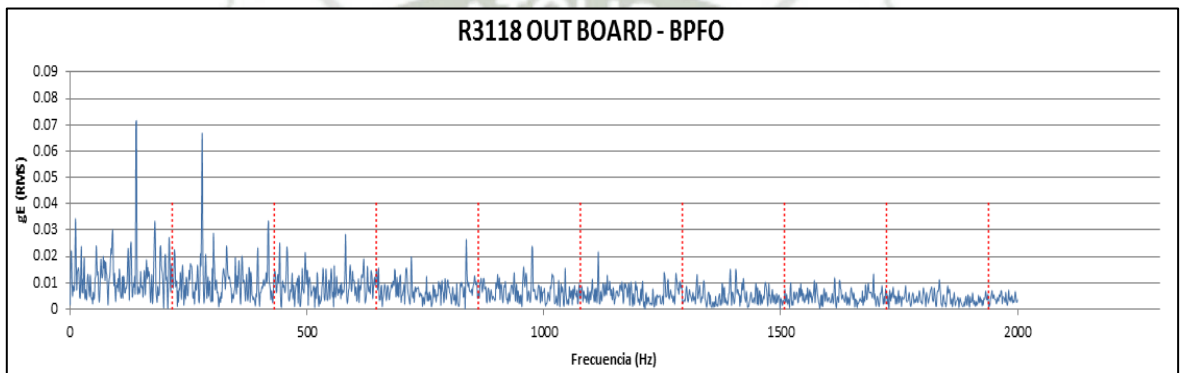


Figura 4. 36: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

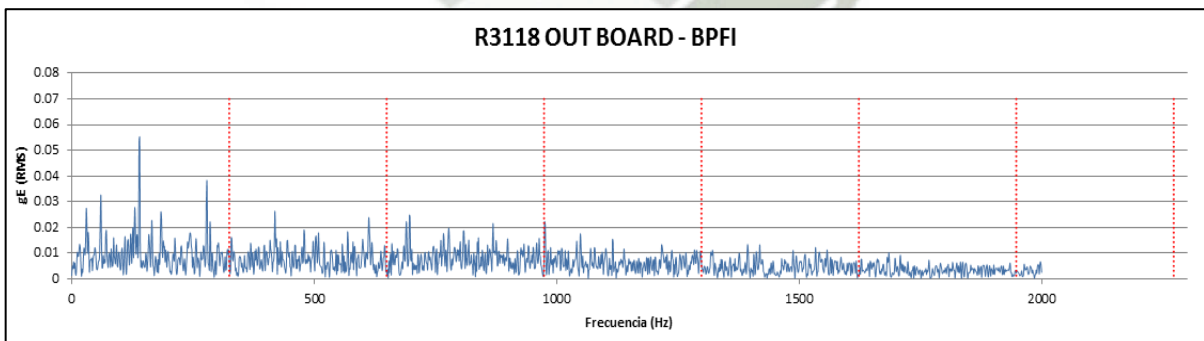


Figura 4. 37: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

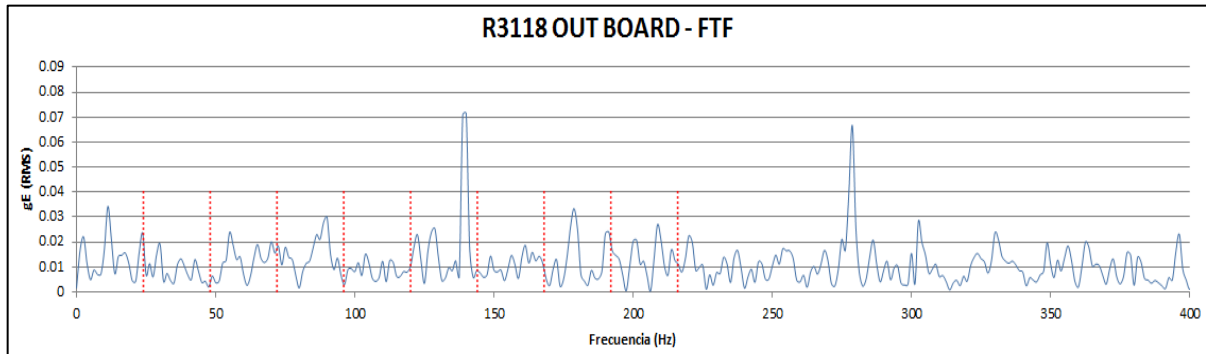


Figura 4. 38: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

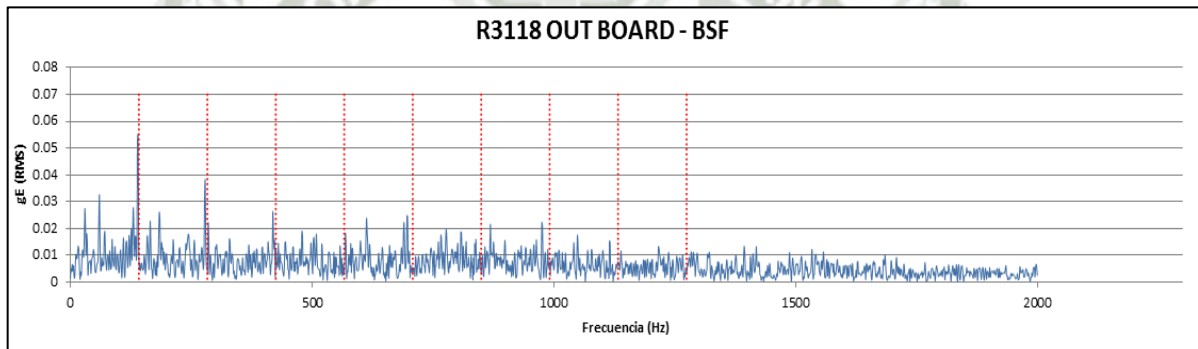


Figura 4. 39: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

4.4.6. Conclusiones previas

En el análisis de los rodamientos del motor R3118 del Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Los valores globales en gE RMS, medidos tanto en el lado acople como en el lado libre están dentro de lo recomendado.
- Las tendencias de los valores globales con respecto a la fecha de la toma de datos tanto del lado libre como el lado acople, no presenta una variación significativa.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado acople, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI y FTF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- En el análisis de los elementos rodantes del lado libre se encontró que las frecuencias de fallas de bolas BSF coinciden con las frecuencias del espectro, lo cual indica una falla en las bolas. Es una falla leve por su bajo valor en amplitud.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado libre, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI y FTF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- En el análisis de los elementos rodantes del lado acople se encontró que las frecuencias de fallas de bolas BSF coinciden con las frecuencias del espectro, lo cual indica una falla en las bolas. Es una falla leve por su bajo valor en amplitud.
- El diagnóstico del análisis de las tendencias de valores globales y de las frecuencias de fallas características de los elementos de los rodamientos, es que los rodamientos del lado libre y del lado acople se encuentran en buen estado.

4.5. Taladro de Pedestal R3119

4.5.1. Descripción

Un taladro de pedestal es una máquina que tiene como principal objetivo realizar un agujero. El taladro está compuesto por una base que sostiene una columna, esta columna a la vez sostiene una mesa. La pieza a realizar el agujero, se puede mantener en la mesa con una morsa o con una abrazadera de amarre o la mesa puede girarse fuera del camino para permitir que las piezas altas sean sostenidas directamente en la base. La altura de la mesa puede ajustarse con una manivela para poder nivelarla a la altura de trabajo que se requiera. La columna también aguanta una cabeza que contiene el motor. El motor del taladro hace girar el eje a una velocidad controlada, el eje tiene un manguito porta broca para sostener las herramientas de corte. El eje se mueve con una manivela o palanca de arriba hacia abajo para realizar el agujero.



Figura 4. 40: Vista general Taladro R3119

Fuente: [Elaboración propia]

Datos de Placa:

Tabla 4. 22: Datos de Placa Taladro R3119

| Motor Taladro R3119 | |
|----------------------------|-------------|
| Tipo | Y90L - 4 |
| Potencia | 1.5 KW |
| Voltaje | 220 / 480 V |
| Frecuencia | 60 HZ |
| Corriente | 8.0 A |
| Velocidad | 1730 RPM |
| Protección | IP 44 |

Fuente: [Elaboración propia]

4.5.1.1. Selección de Rodamiento

El motor del taladro AG32, en los datos de placa no especifica el número de rodamiento que usa; por lo tanto, se seleccionará los rodamientos del motor con el tamaño de la carcasa que se tiene en los datos de placa.

En la tabla del Anexo XI se ingresa con el dato de tamaño de carcasa que para este caso es de 90L y se tiene como resultado que este motor usa un rodamiento 6205 2Z.

En el Anexo X, se tiene las características de los rodamientos 6205 2Z, la Tabla 4.23 contiene las características principales del rodamiento seleccionado.

Tabla 4. 23: Características Rodamiento 6205

| Características Rodamiento 6205 2Z | |
|------------------------------------|------------|
| Número de Bolas | 9 unidades |
| Ángulo de contacto | 0° |
| Diámetro exterior | 52 mm |
| Diámetro interior | 46.3 mm |
| Velocidad Aprox. De trabajo | 1730 RPM |

Fuente: [Elaboración propia]

4.5.2. Situación Actual del equipo

El taladro R3119 se encuentra ubicado en el Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica de Santa María, este equipo es usado por los alumnos para las prácticas de Procesos de Manufactura y en otras operaciones.

Para realizar el agujero al material con las brocas respectivas, el eje del taladro es accionado por un motor eléctrico de 1.5 KW de potencia, el equipo trabaja con una fuente de voltaje de 220 / 480 V de manera intermitente, usado entre 2 a 3 horas diarias.

De acuerdo a la inspección inicial del motor, este se encuentra operativo, funciona correctamente durante el arranque y parada, no presenta ruidos extraños en el rodamiento tanto del lado libre como en el lado acople y tiene buenas condiciones de trabajo. No se tiene información de que se haya realizado algún mantenimiento a este motor y no tiene data histórica de toma y análisis de vibraciones anteriores.

Al no tener un mantenimiento ni toma de vibraciones en este motor, este tiene incertidumbre del estado de funcionamiento de los rodamientos. Por lo tanto, se realiza la inspección por análisis vibracional al motor del taladro. Se realizará el análisis en el lado acople y lado libre, para ver el estado de los rodamientos del motor.

4.5.3. Configuración para la colección de datos

Para la colección de datos adecuados, lo primero en realizar es seleccionar los puntos en donde se realizará la toma de datos; en este caso, se analiza solo el estado de los rodamientos y se seleccionará los puntos adecuados para esta medición. Para el análisis de los rodamientos se utilizará la técnica de modulación, la cual la posición del sensor es radial. Por lo que, la toma de datos se realizará en el

lado acople en posición radial y en el lado libre en posición radial como se muestra en la Figura 4.41, para conocer el estado del rodamiento.



Figura 4. 41: Puntos de medición del motor de taladro R3119

Fuente: [Elaboración propia]

En la Tabla 4.24 se encuentra la especificación de los puntos de medición en el motor y en el equipo de medición.

Tabla 4. 24: Posición de colección de datos

| Posición | Ubicación en Motor | Designación | Configuración en el Equipo medición |
|----------|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Lado Acople | In Board | R3119-IR |
| 2 | Lado Libre | Out board | R3119-OR |

Fuente: [Elaboración propia]

Los datos que se introducen en el equipo de medición de vibraciones son los siguientes:

- Canal: el puerto del equipo de medición, en el cual se conecta el cable más el sensor de medición.
- Sensor: Tipo de sensor que se usara.
- Señal: Gráfica que se mostrará en la pantalla.
- Unidad eje Y: En que unidades se requiere en el eje Y.
- Banda gE: Filtro paso alto o filtro de envolvente
- Rango de Frecuencia: El rango de amplitud máximo esperado.
- Detección: Tipo de detección para fines de visualización.
- Número de líneas: Resolución de la medición.

Se utiliza la Tabla 4.25 para seleccionar la Banda de frecuencia, el filtro pasa alto, el número de promedios y el número de líneas de resolución. Estos valores son los recomendados para la configuración del equipo de colección de datos ingresando con la velocidad de giro del motor que en este caso está en el rango de 250 a 5 000 RPM.

Tabla 4. 25: Selección de datos para configuración

| Velocidad (RPM) | Banda de Frecuencia | Filtro pasa Alto | Número de promedio | Min. Líneas |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 0 - 50 | 5 a 100 Hz | 500 Hz. | 1 | 800 |
| 25 – 500 | 50 – 1 000 Hz | 1000 Hz. | 1 | 800 |
| 250 - 5000 | 500 – 10 000 Hz | 2000 Hz. | 1 | 1600 |
| 4001-en adelante | 5 000 a 40 000 Hz | 5000 Hz. | 1 | 1600 |

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

La configuración del equipo de la colección para este motor será la la que se muestra en la Tabla 4.26.

Tabla 4. 26: Configuración del Equipo de Colección de datos

| Configuración de Equipo SKF Micrologig Analyzer GX | |
|---|-------------|
| Canal de medición | CH1 |
| Sensor | CMSS 2111 |
| Ver Señal | Espectro |
| Unidad eje Y | gE |
| Banda gE | 500 - 10KHz |
| Rango frecuencias | 2000 Hz |
| Detección | RMS |
| Líneas | 1600 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.5.4. Colección de datos.

La colección de datos es importante dentro del análisis vibracional a los rodamientos de los motores, una mala toma de datos puede ser determinante y dar fallas erróneas. Por lo tanto, es importante usar el sensor indicado y el método de acople.

Para la colección de datos se usa un sensor CMSS 2111 de las cuales sus características se encuentran en la Tabla 4.27. Se usará con acople magnético debido a que es un sensor temporal que solo será usado para toma específica y tiene fácil acceso para la toma de datos.

Tabla 4. 27: Características sensor CMSS 2211

| Características Sensor CMSS 2111 | |
|----------------------------------|--------------|
| Sensor | Acelerómetro |
| Número de serie | P164036 |
| Marca | SKF |
| Acople | Magnético |

Fuente: [Elaboración Propia]

En la Figura 4.42 se observa la colección de datos del lado libre del motor, de igual manera se debe colocar en el lado acople. El sensor debe estar ubicado en una zona maciza del motor y no en la carcasa para que los datos obtenidos sean los más acertados posibles.



Figura 4. 42: Ubicación del sensor en el taladro R3119

Fuente: [Elaboración Propia]

4.5.5. Análisis de los resultados

El análisis de los espectros de los rodamientos proporciona información de la evaluación del estado, donde se analiza tanto la amplitud global del espectro, la tendencia de la amplitud global y las frecuencias de fallas de los rodamientos que son: frecuencia de falla de pista externa (BPFO), frecuencia de falla de pista interna (BPFI), frecuencia de falla de canastilla (FTF) y frecuencia de falla de las bolas (BSF), estos valores de las constantes de frecuencia de falla se encuentran en el Anexo IX.

4.5.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia.

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado acople (In Board) del motor se muestra en la Figura 4.43.

El valor global de la última medición es de 0.19 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado acople tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

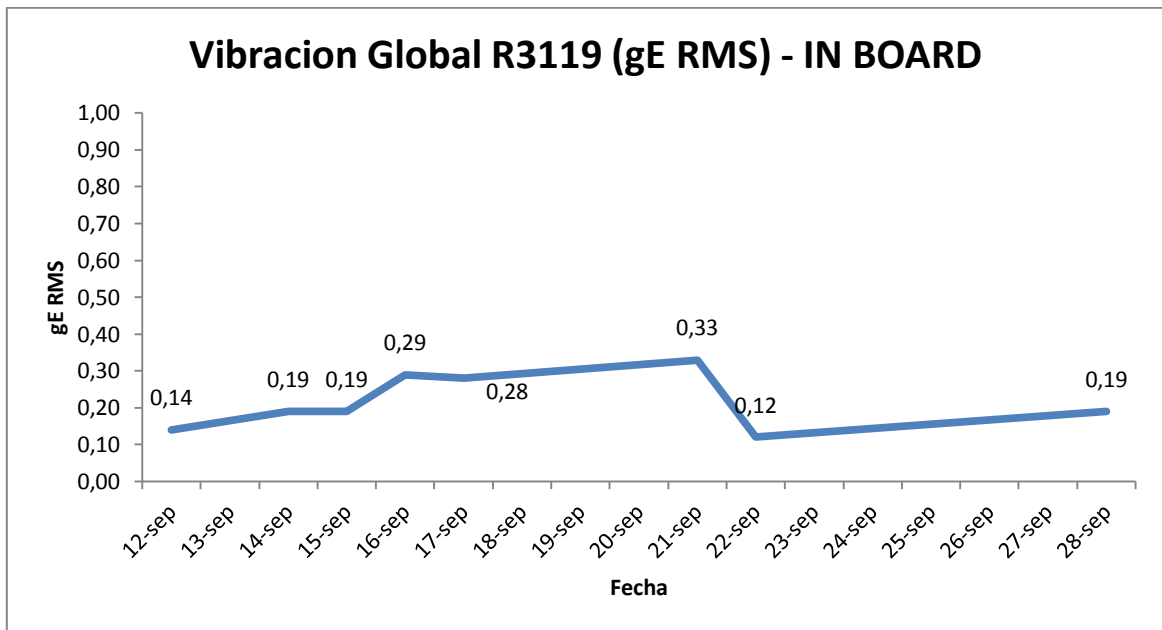


Figura 4. 43: Tendencia de valor Global lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado libre (Out Board) del motor, se muestra en la Figura 4.44.

El valor global de la última medición es de 0.16 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado libre tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

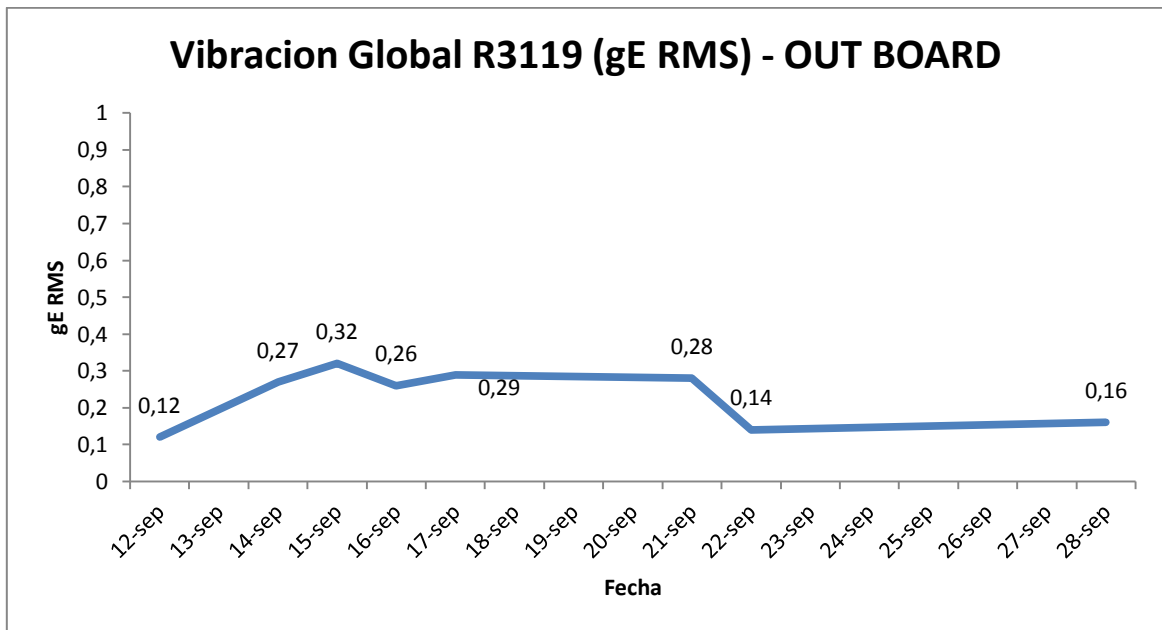


Figura 4. 44: Tendencia de valor Global lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.5.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos

Según la Tabla 4.28 de constantes de frecuencia de fallas del rodamiento 6205, se selecciona la constante del componente del rodamiento que se quiere analizar. La constante se multiplica por la velocidad de giro del motor o la frecuencia de giro, según las unidades que se utilice para el análisis, en este caso es 60 Hz porque se analiza en las unidades de frecuencia.

Se analizará las frecuencias de fallas y sus armónicos (1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X) y si coinciden con algún pico o picos representativos en el espectro.

Tabla 4. 28: Constantes de fallas rodamiento 6205

| Constantes de Fallas en Rodamiento: 6205 | | | |
|--|------|-----|------|
| BPFO | BPMF | FTF | BSF |
| 3.59 | 5.41 | 0.4 | 2.36 |

Fuente: [Elaboración Propia]

En las figuras desde la Figura 4.45 a la Figura 4.52, están los últimos espectros colectados. En estas se encuentran el análisis de las frecuencias de fallas y armónicos.

El análisis de los componentes del rodamiento, como la pista externa, pista interna, canastilla y bolas sus frecuencias de fallas y armónicos no coinciden con los picos representativos del espectro.

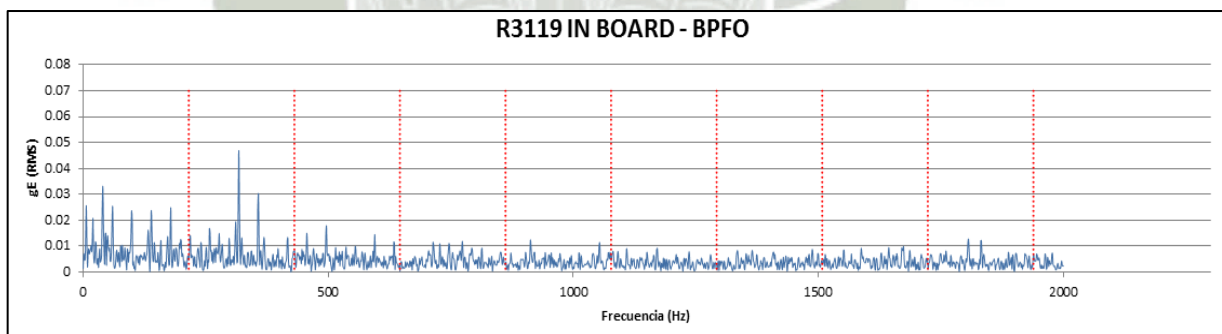


Figura 4. 45: Análisis de espectro de envoltorio de pista externa lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

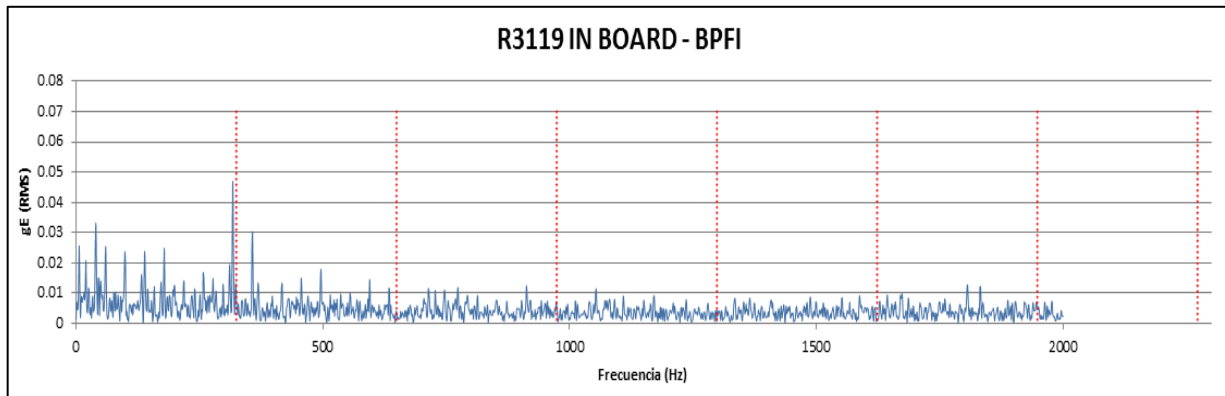


Figura 4. 46: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

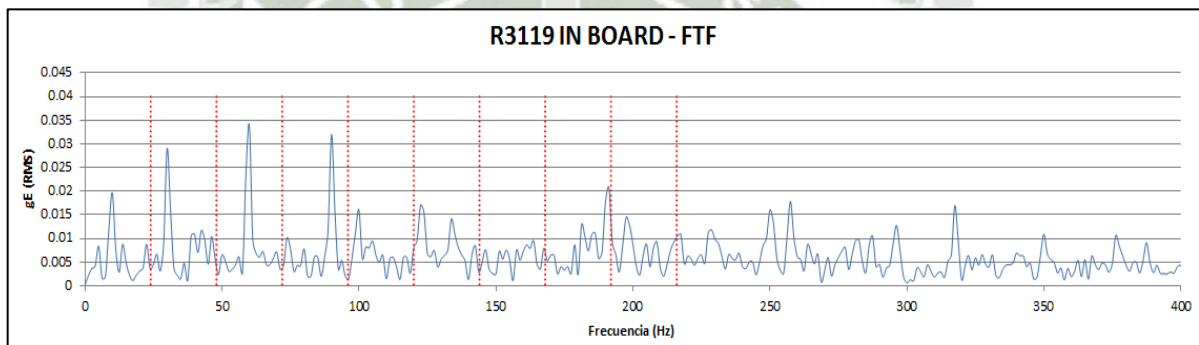


Figura 4. 47: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

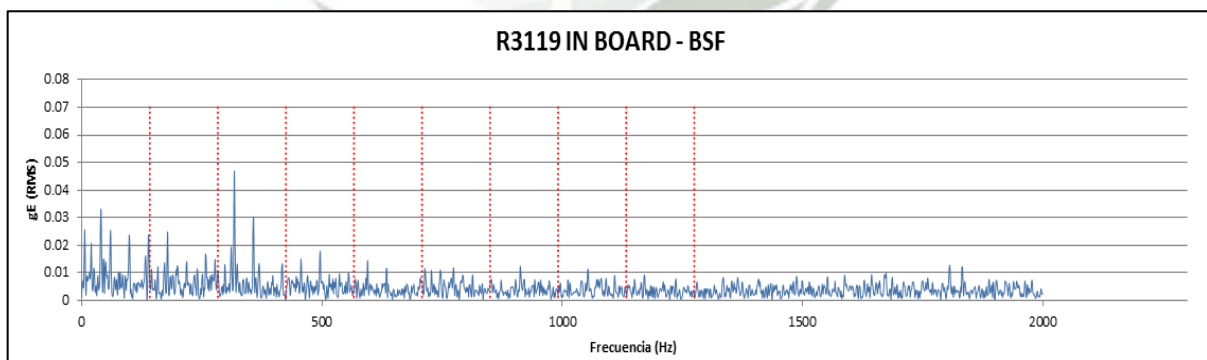


Figura 4. 48: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

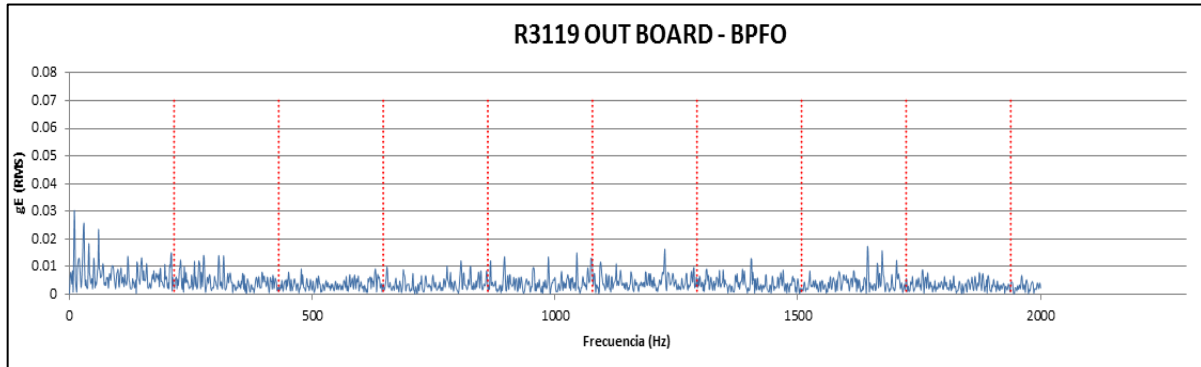


Figura 4. 49: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

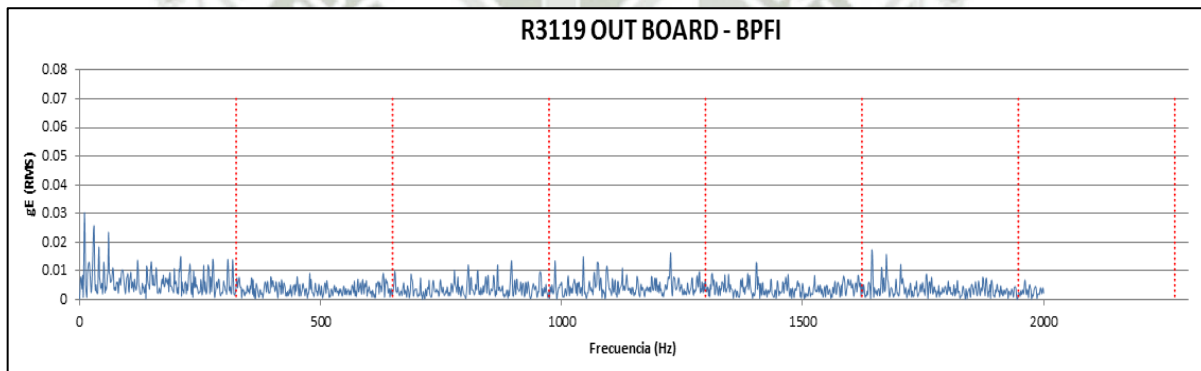


Figura 4. 50: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

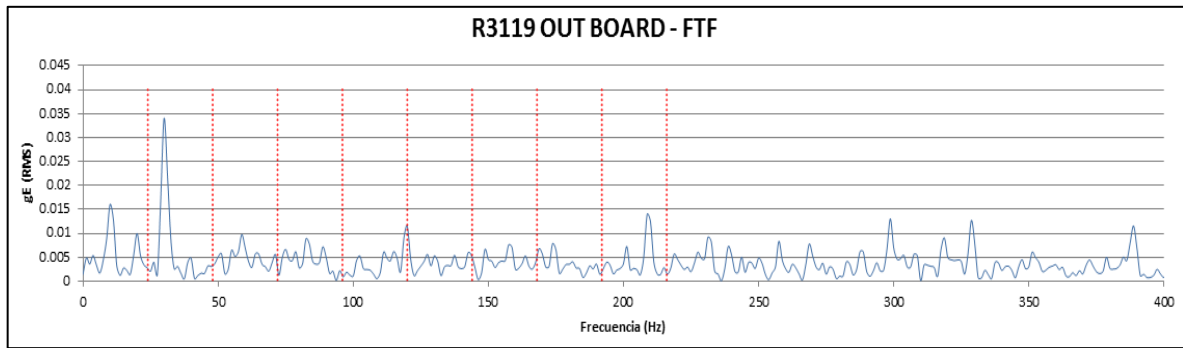


Figura 4. 51: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

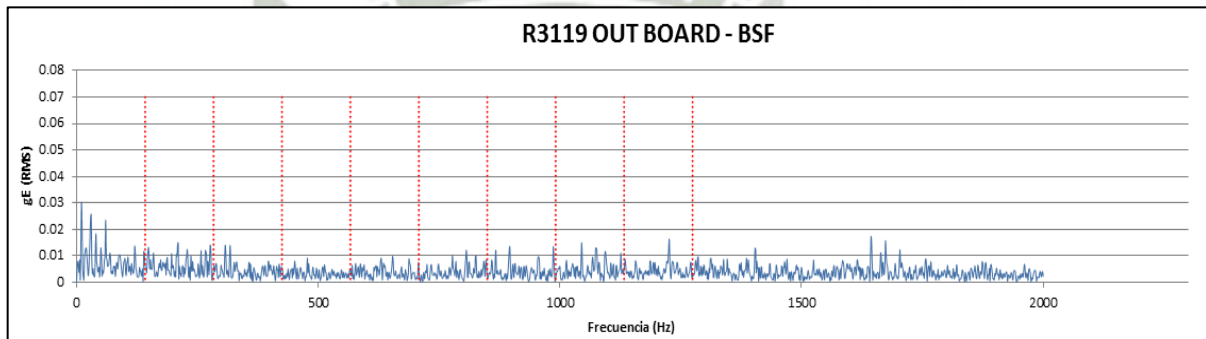


Figura 4. 52: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.5.6. Conclusiones previas

En el análisis de los rodamientos del motor R3119 del Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Los valores globales en gE RMS, medidos tanto en el lado acople como en el lado libre están dentro de lo recomendado.
- Las tendencias de los valores globales con respecto a la fecha de la toma de datos tanto del lado libre como el lado acople, no presenta una variación significativa.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado acople, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPF1, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado libre, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPF1, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- El diagnóstico del análisis de las tendencias de valores globales y de las frecuencias de fallas características de los elementos de los rodamientos, es que los rodamientos del lado libre y del lado acople se encuentran en buen estado.

4.6. Brabender

4.6.1. Descripción

El brabender es un equipo que tiene como principal función mezclar, que tiene un par de torsión requerido para hacer girar las paletas del

rotor a una velocidad fija como una función del tiempo durante el mezclado.

El par que se produce por la resistencia de un material a la acción de cizalladora es un indicador indirecto de la tensión de cizallamiento y a su vez la velocidad del rotor será un indicador indirecto de la velocidad de cizallamiento. El par y los datos de velocidad del rotor se pueden convertir en viscosidad y velocidad de cizallamiento mediante el uso de correlaciones matemáticas con base en las dimensiones del instrumento.



Figura 4. 53: Vista general Brabender

Fuente: [Elaboración Propia]

Datos de Placa:

Tabla 4. 29: Datos de Placa motor 10171

| Motor Brabender 10171 | |
|----------------------------------|-------------|
| Tipo | Y2-90S – 4 |
| Potencia | 1.1 KW |
| Voltaje | 220 / 440 V |
| Frecuencia | 60 HZ |
| Corriente | 4.6 A |
| Velocidad | 1700 RPM |
| Protección | IP 55 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.6.1.1. Rodamiento del motor

En el Anexo X, se tiene las características de los rodamientos 6205 2Z, la Tabla 4.30 contiene las características principales del rodamiento seleccionado.

Tabla 4. 30: Características Rodamiento 6205

| Características Rodamiento 6205 2Z | |
|---|------------|
| Número de Bolas | 9 unidades |
| Ángulo de contacto | 0° |
| Diámetro exterior | 52 mm |
| Diámetro interior | 46.3 mm |
| Velocidad Aprox. De trabajo | 1730 RPM |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.6.2. Situación Actual del equipo

La máquina Brabender se encuentra ubicada en el Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica de Santa María, el cual se encuentra operativo y funcionando correctamente, este equipo es usado por los alumnos para las prácticas de Materiales.

Para realizar el agujero al material con las brocas respectivas, el eje del taladro es accionado por un motor eléctrico de 1.1 KW de potencia, el equipo trabaja con una fuente de voltaje de 220 / 480 V de manera intermitente usado entre 1 a 2 horas diarias.

En la inspección inicial del motor, este se encuentra operativo, funciona correctamente durante el arranque y parada, no presenta ruidos extraños en el rodamiento tanto del lado libre como en el lado acople y tiene buenas condiciones de trabajo. No se tiene información de que se haya realizado algún mantenimiento a este motor y no tiene data histórica de toma y análisis de vibraciones anteriores.

Al no tener un mantenimiento ni tomas de vibraciones en este motor, este tiene incertidumbre de su estado de funcionamiento. Por lo tanto, se realiza la inspección por análisis vibracional al motor del taladro. Se realizará el análisis en el lado acople y lado libre, para ver el estado de los rodamientos del motor.

4.6.3. Configuración para la colección de datos

Para la colección de datos adecuados, lo primero en realizar es seleccionar los puntos en donde se realizará la toma de datos; en este caso, se analiza solo el estado de los rodamientos y se seleccionará

los puntos adecuados para esta medición. Para el análisis de los rodamientos se utilizará la técnica de modulación, la cual la posición del sensor es radial. Por lo que, la toma de datos se realizará en el lado acople en posición radial y en el lado libre en posición radial como se muestra en la Figura 4.54, para conocer el estado del rodamiento.



Figura 4. 54: Puntos de medición del motor Brabender

Fuente: [Elaboración Propia]

En la Tabla 4.31 se encuentra la especificación de los puntos de medición en el motor y en el equipo de medición.

Tabla 4. 31: Posición de colección de datos

| Posición | Ubicación en Motor | Designación | Configuración en el Equipo medición |
|----------|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Lado Libre | Out Board | BRA - OR |
| 2 | Lado Acople | In Board | BRA - IR |

Fuente: [Elaboración Propia]

Los datos que se introducen en el equipo de medición de vibraciones son los siguientes:

- Canal: el puerto del equipo de medición, en el cual se conecta el cable más el sensor de medición.
- Sensor: Tipo de sensor que se usara.
- Señal: Gráfica que se mostrará en la pantalla.
- Unidad eje Y: En que unidades se requiere en el eje Y.
- Banda gE: Filtro paso alto o filtro de envolvente
- Rango de Frecuencia: El rango de amplitud máximo esperado.
- Detección: Tipo de detección para fines de visualización.
- Número de líneas: Resolución de la medición.

Se utiliza la Tabla 4.32 para seleccionar la Banda de frecuencia, el filtro pasa alto, el número de promedios y el número de líneas de resolución. Estos valores son los recomendados para la configuración del equipo de colección de datos ingresando con la velocidad de giro del motor que en este caso está en el rango de 250 a 5 000 RPM.

Tabla 4. 32: Selección de datos para configuración

| Velocidad (RPM) | Banda de Frecuencia | Filtro pasa Alto | Número de promedio | Min. Líneas |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 0 - 50 | 5 a 100 Hz | 500 Hz. | 1 | 800 |
| 25 – 500 | 50 – 1 000 Hz | 1000 Hz. | 1 | 800 |
| 250 - 5000 | 500 – 10 000 Hz | 2000 Hz. | 1 | 1600 |
| 4001-en adelante | 5 000 a 40 000 Hz | 5000 Hz. | 1 | 1600 |

Fuente: [SKF Análisis de vibraciones, 2010]

La configuración del equipo de la colección para este motor será la la que se muestra en la Tabla 4.33.

Tabla 4. 33: Configuración del Equipo de Colección de datos

| Configuración de Equipo SKF Micrologig Analyzer GX | |
|---|-------------|
| Canal de medición | CH1 |
| Sensor | CMSS 2111 |
| Ver Señal | Espectro |
| Unidad eje Y | gE |
| Banda gE | 500 - 10KHz |
| Rango frecuencias | 2000 Hz |
| Detección | RMS |
| Líneas | 1600 |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.6.4. Colección de datos.

La colección de datos es importante dentro del análisis vibracional a los rodamientos de los motores, una mala toma de datos puede ser determinante y dar fallas erróneas. Por lo tanto, es importante usar el sensor indicado y el método de acople.

Para la colección de datos se usa un sensor CMSS 2111 de las cuales sus características se encuentran en la Tabla 4.34. Se usará con acople magnético debido a que es un sensor temporal que solo será usado para toma específica y tiene fácil acceso para la toma de datos.

Tabla 4. 34: Características sensor CMSS 2211

| Características Sensor CMSS 2111 | |
|----------------------------------|--------------|
| Sensor | Acelerómetro |
| Número de serie | P164036 |
| Marca | SKF |
| Acople | Magnético |

Fuente: [Elaboración Propia]

4.6.5. Análisis de los resultados

Para el análisis de fallas de los rodamientos, para conocer el estado de se analiza tanto la amplitud global del espectro, la tendencia de la amplitud global y las frecuencias de fallas de los rodamientos ya sea de pista externa (BPFO), pista interna (BPFI), de canastilla (FTF) o de las bolas (BSF) estos valores de las constantes de frecuencia de falla se encuentran en el Anexo IX.

4.6.5.1. Análisis de la Amplitud Global y Tendencia.

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado acople (In Board) del motor se muestra en la Figura 4.55.

El valor global de la última medición es de 0.06 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, presenta una ligera variación. Por lo cual, el rodamiento del lado acople tiene un comportamiento creciente, que se puede atribuir a una falla prematura.

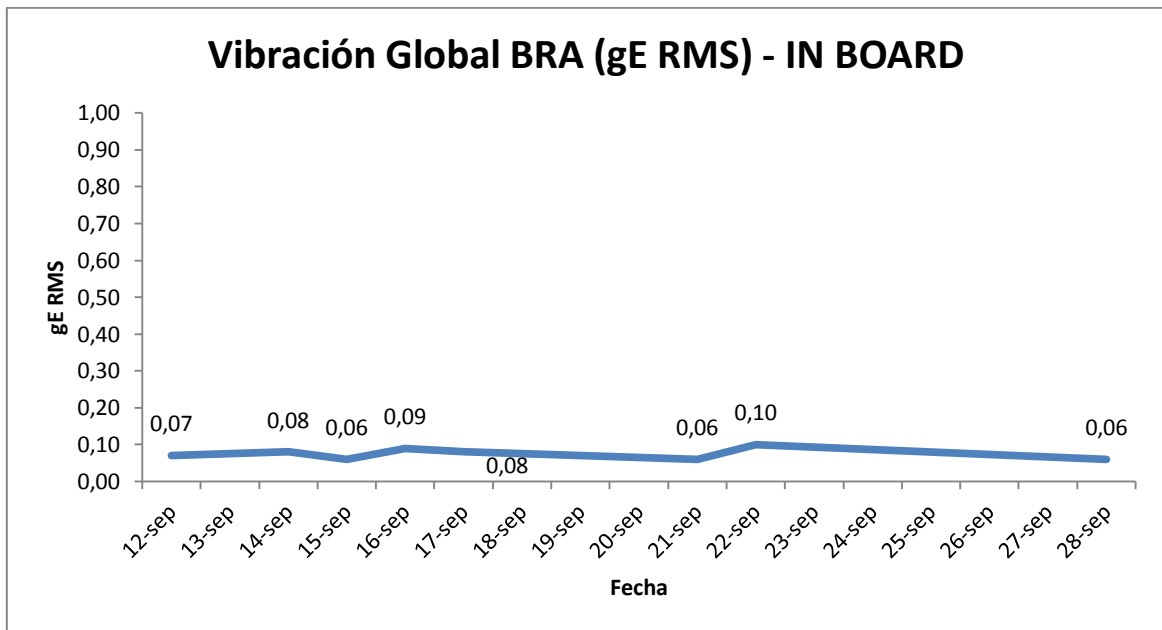


Figura 4. 55: Tendencia de valor Global lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

La tendencia de la amplitud de los valores globales (gE RMS) versus la fecha de medición de la colección de datos del lado libre (Out Board) del motor, se muestra en la Figura 4.56.

El valor global de la última medición es de 0.16 gE RMS, que se encuentran dentro de los valores recomendados por SKF como se puede ver en la tabla del Anexo XII.

La tendencia de los valores globales con respecto a la fecha de colección de datos, no presenta una variación determinante. Por lo cual, el rodamiento del lado libre tiene un comportamiento normal respecto al tiempo.

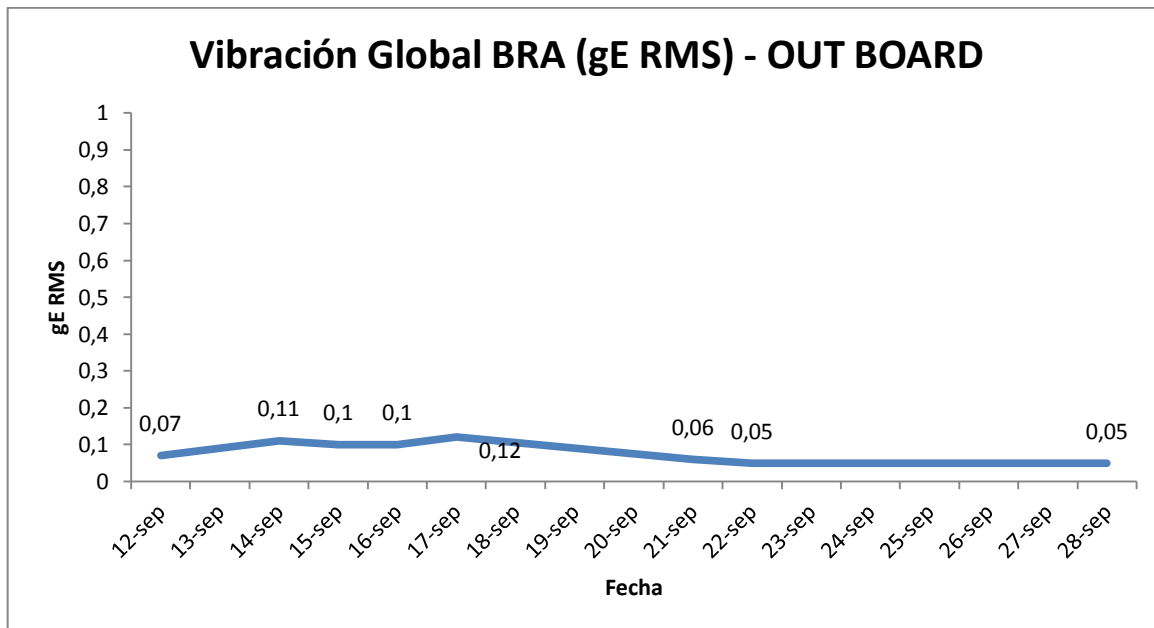


Figura 4. 56: Tendencia de valor Global lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.6.5.2. Análisis de la frecuencia de Fallas y armónicos

Según la Tabla 4.21 de constantes de frecuencia de fallas del rodamiento 6205, se selecciona la constante del componente del rodamiento que se quiere analizar. La constante se multiplica por la velocidad de giro del motor o la frecuencia de giro, según las unidades que se utilice para el análisis, en este caso es 60 Hz porque se analiza en las unidades de frecuencia.

Se analizará las frecuencias de fallas y sus armónicos (1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X) y si coinciden con algún pico o picos representativos en el espectro.

Tabla 4. 35: Constantes de fallas rodamiento 6205

| Constantes de Fallas en Rodamiento: 6205 | | | |
|--|------|-----|------|
| BPFO | BPMF | FTF | BSF |
| 3.59 | 5.41 | 0.4 | 2.36 |

Fuente: [Elaboración Propia]

En las figuras desde la Figura 4.57 a la Figura 4.64, están los últimos espectros colectados. En estas se encuentran el análisis de las frecuencias de fallas y armónicos.

El análisis de los componentes del rodamiento, como la pista externa, pista interna, canastilla y bolas sus frecuencias de fallas y armónicos no coinciden con los picos representativos del espectro.

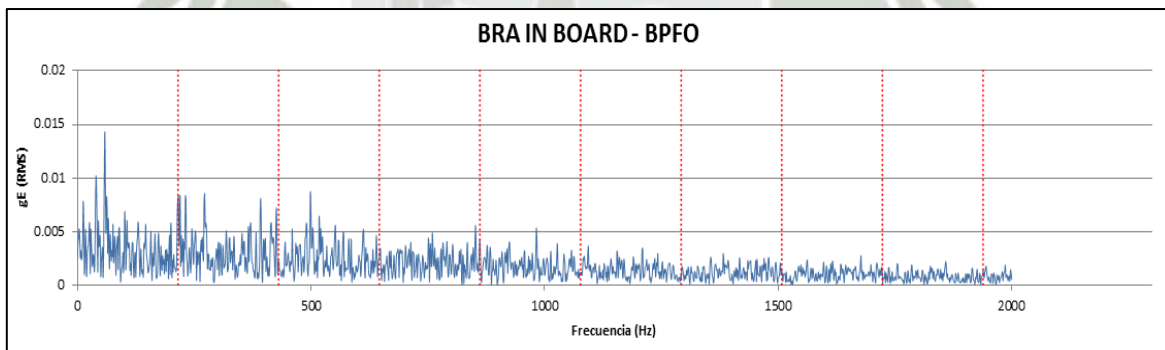


Figura 4. 57: Análisis de espectro de envoltente de pista externa lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

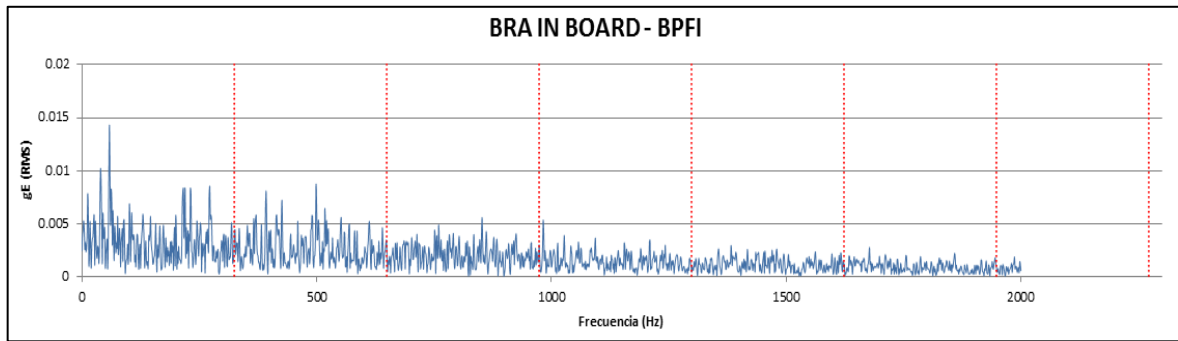


Figura 4. 58: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

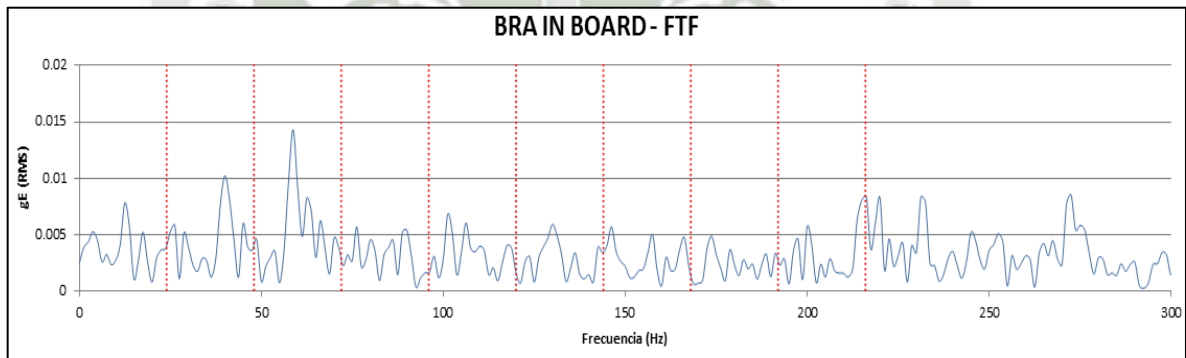


Figura 4. 59: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

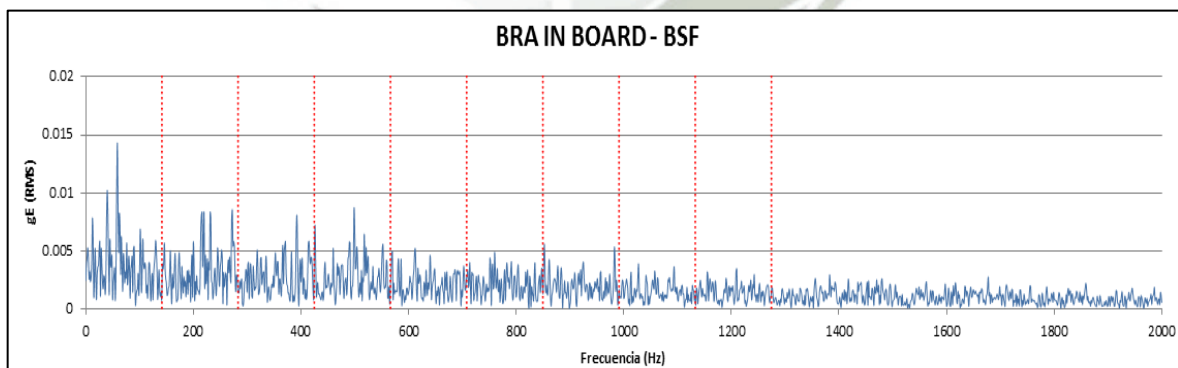


Figura 4. 60: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado acople

Fuente: [Elaboración Propia]

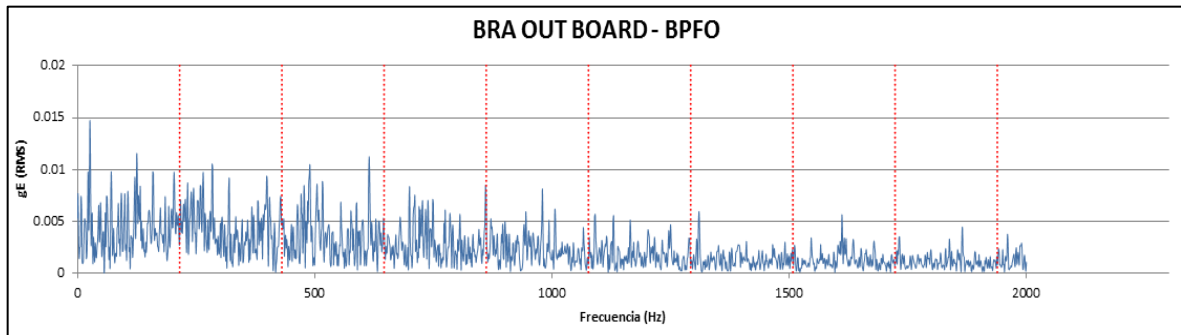


Figura 4. 61: Análisis de espectro de envolvente de pista externa lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

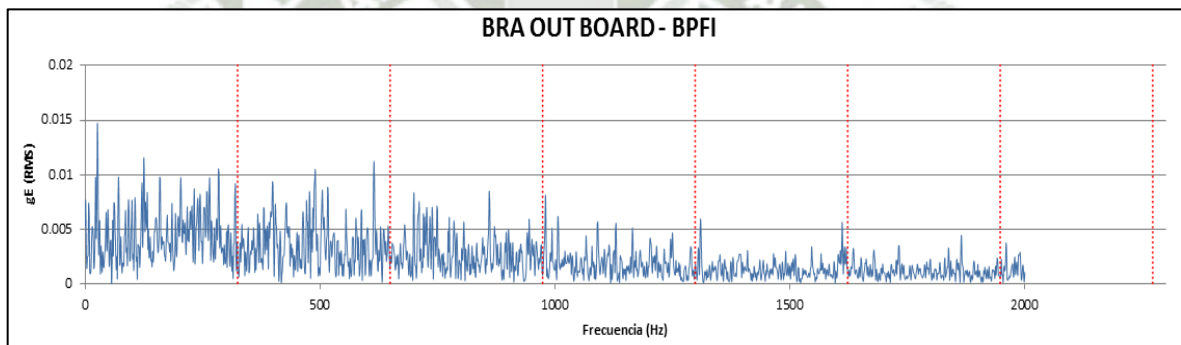


Figura 4. 62: Análisis de espectro de envolvente de pista interna lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

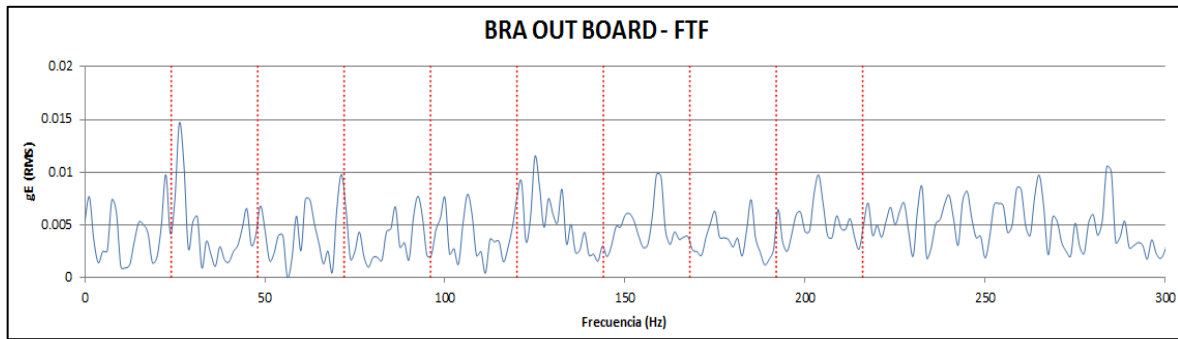


Figura 4. 63: Análisis de espectro de envolvente de canastilla lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

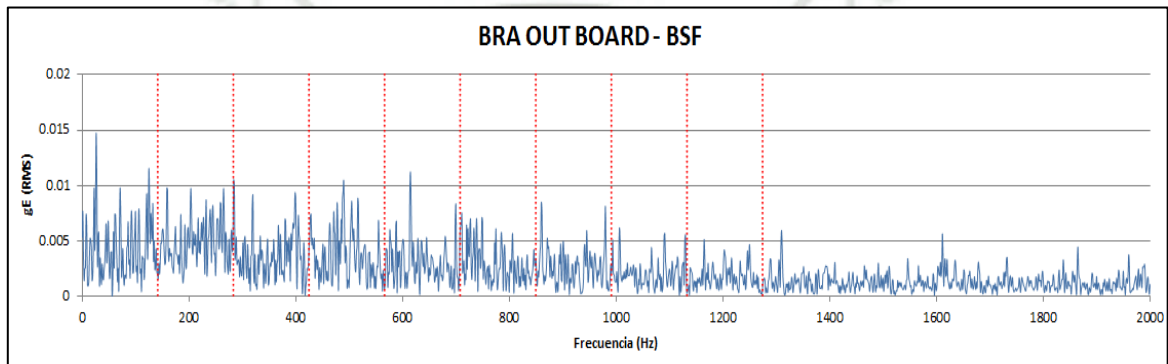


Figura 4. 64: Análisis de espectro de envolvente de bolas lado libre

Fuente: [Elaboración Propia]

4.6.6. Conclusiones previas

En el análisis de los rodamientos del motor Brabender del Taller de Ingeniería Mecánica Eléctrica se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Los valores globales en gE RMS, medidos tanto en el lado acople como en el lado libre están dentro de lo recomendado.

- Las tendencias de los valores globales con respecto a la fecha de la toma de datos tanto del lado libre como el lado acople, no presenta una variación significativa.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado acople, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- En el análisis de los elementos del rodamiento del lado libre, las frecuencias de falla y sus armónicos de BPFO, BPFI, FTF y BSF no coinciden con los picos obtenidos en el espectro.
- El diagnóstico del análisis de las tendencias de valores globales y de las frecuencias de fallas características de los elementos de los rodamientos, es que los rodamientos del lado libre y del lado acople se encuentran en buen estado.

5. CONCLUSIONES

- El método de ensayos vibracional es una herramienta muy útil para diagnosticar el estado de los rodamientos de un motor eléctrico dado que permite identificar fallas incipientes en los rodamientos. Permite realizar el monitoreo sin ser necesario detener el las máquinas rotativas ni el proceso.
- Para realizar un correcto diagnóstico del análisis vibracional se requiere realizar una correcta configuración del equipo, que la colección de datos sea en los puntos de medición establecidos y el análisis con los métodos establecidos.
- En las máquinas seleccionadas solo se midieron espectros a los rodamientos, los resultados obtenidos se toman como referencia para posteriores análisis; ya que, es la primera vez que se colecta datos.

- En el método de análisis vibracional se han evidenciado los siguientes modos de falla:
 - BPFO o frecuencia de deterioro de la pista exterior. Físicamente es la frecuencia en la los elementos rodantes pasan por un punto de la pista exterior dañada o deteriorada cada vez que el eje realiza un giro completo.
 - BPFI o frecuencia de deterioro de la pista interior. Físicamente es la frecuencia en lo que los elementos rodantes pasan por un punto de la pista interior dañada o deteriorada cada vez que el eje realiza un giro completo.
 - BSF o frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Físicamente es la frecuencia en que uno o más elementos rodantes, tienen sobre su punto de contacto la falla cada vez que el eje realiza un giro completo.
 - FTF o frecuencia de deterioro de la canastilla. Físicamente es la frecuencia con la que la canastilla muestra algún defecto cada vez que el eje realiza un giro completo.
- En base al diagnóstico del método de análisis de los espectros vibracionales obtenidos a lo largo de este periodo de estudio, se puede concluir que el estado de 4 de los 5 motores analizados, se encuentran en una condición normal.
- Gracias al estudio de los espectros vibracionales, se diagnosticó que el motor R3118 perteneciente a un taladro de pedestal, presenta una falla incipiente en los elementos rodantes (BSF) de su rodamiento lado acople. Este rodamiento se requiere monitorear para evaluar su incremento de vibración.

6. RECOMENDACIONES

- Capacitar a personal en esta técnica de monitoreo de condición para poder realizar la medición y análisis en el laboratorio.
- Elaborar un módulo de pruebas para el estudio de todas las fallas que se pueden evidenciar con el análisis vibracional.
- Monitorear los motores para establecer tendencias con más datos para un mejor análisis de estos.
- Generar una metodología para toma de decisiones de mantenimiento, basados en el estudio de análisis de causa raíz.
- Incentivar el estudio de monitoreo de condición basado en el análisis vibracional de baja frecuencia.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [A-MAQ S.A.] ANALISIS DE MAQUINARIA Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico.
Disponible en internet: <http://www.a-preditecor.com/tutorial.html/>
- [BOWER] Bearing Frequencies, 2014.
- [ESHLEMAN RONALD. L] Introducción a las Vibraciones de Máquinas, Vibration Institute, 2012.
- [ENAP SIPESTROL] Matriz de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Confiabilidad operacional, 2008
- [Estupiñan, Edgar] Técnicas de Diagnóstico para Análisis de Vibraciones en Rodamientos. 2011.

- [GARCIA CASTRO], Alfonso y BORRAS, Carlos. Análisis de vibración en máquinas. Bucaramanga, 1995.
- [GLENN, W]. Vibraciones Mecánicas. Alemania: DLI Engineering Corp, 2003.
- [JAMES E. BERRY, PE] Technical Associates Vibration Anaysis II. Technical Associates of Charlotte, Inc. 1995
- [MOROCHO] M. Análisis Vibracional y Alineamiento Láser. Riobamba – Ecuador: DocuCentro, 2003.
- [SAAVEDRA GARCÍA, PEDRO] Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias, Nivel 1, 2001.
- [SKF] Análisis de Vibraciones Categoría 1, 2010
- [SKF] Catalogo General, 2015
- [WEG] ,Motor Eléctrico , 2015

ANEXO I ANALISIS DE REDUCTOR BOMBA



ANEXO I ANALISIS DE REDUCTOR BOMBA

Datos del equipo: Bomba

Componente: Reductor

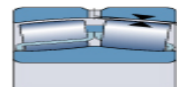
Antecedentes: Se reportó cambio de reductor por presentar armónicos de BPFO del rodamiento del eje de baja y por presentar tendencia en alarma de envolvente y onda en el tiempo. El análisis de aceite no muestra tendencia de los elementos de desgaste.

Evaluación del componente: Al desmontar el reductor se ha encontrado con abundante limallas en el fondo de la caja, además se encontró las pistas interior y exterior con descamación severa en una hilera.

Posibles causas: Lubricación deficiente, sobrecarga, juego interno incorrecto, contaminación del lubricante, mal montaje del rodamiento.

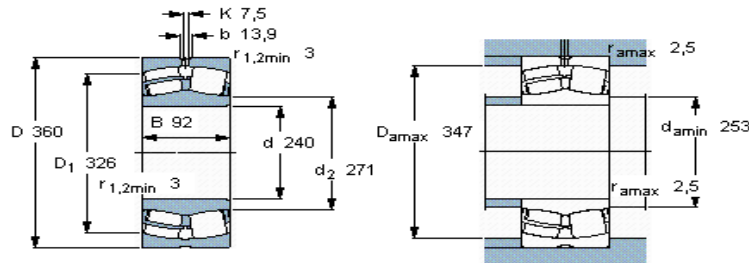
Estudio del Rodamiento: Rodamiento 23048 – Características Principales

Tabla 2: Juego radial interno de los rodamientos de rodillos a rótula con agujero cilíndrico



| Diámetro del agujero d más de | incl. | Juego radial interno | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|----------------------|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | C2 | | Normal | | C3 | | C4 | | C5 | |
| mm | | mín | máx | mín | máx | mín | máx | mín | máx | mín | máx |
| | | µm | | | | | | | | | |
| 18 | 24 | 10 | 20 | 20 | 35 | 35 | 45 | 45 | 60 | 60 | 75 |
| 24 | 30 | 15 | 25 | 25 | 40 | 40 | 55 | 55 | 75 | 75 | 95 |
| 30 | 40 | 15 | 30 | 30 | 45 | 45 | 60 | 60 | 80 | 80 | 100 |
| 40 | 50 | 20 | 35 | 35 | 55 | 55 | 75 | 75 | 100 | 100 | 125 |
| 50 | 65 | 20 | 40 | 40 | 65 | 65 | 90 | 90 | 120 | 120 | 150 |
| 65 | 80 | 30 | 50 | 50 | 80 | 80 | 110 | 110 | 145 | 145 | 185 |
| 80 | 100 | 35 | 60 | 60 | 100 | 100 | 135 | 135 | 180 | 180 | 225 |
| 100 | 120 | 40 | 75 | 75 | 120 | 120 | 160 | 160 | 210 | 210 | 260 |
| 120 | 140 | 50 | 95 | 95 | 145 | 145 | 190 | 190 | 240 | 240 | 300 |
| 140 | 160 | 60 | 110 | 110 | 170 | 170 | 220 | 220 | 280 | 280 | 350 |
| 160 | 180 | 65 | 120 | 120 | 180 | 180 | 240 | 240 | 310 | 310 | 390 |
| 180 | 200 | 70 | 130 | 130 | 200 | 200 | 260 | 260 | 340 | 340 | 430 |
| 200 | 225 | 80 | 140 | 140 | 220 | 220 | 290 | 290 | 380 | 380 | 470 |
| 225 | 250 | 90 | 150 | 150 | 240 | 240 | 320 | 320 | 420 | 420 | 520 |

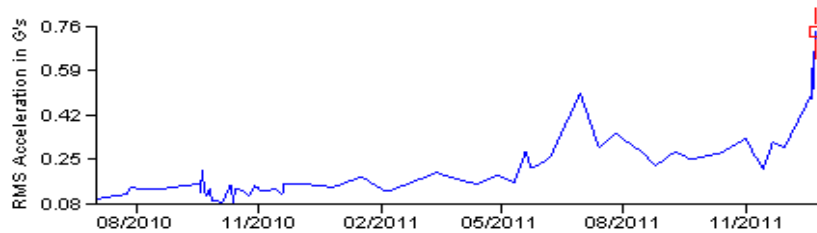
| Dimensiones principales | | | Capacidades de carga | | Carga límite de fatiga P_u | Velocidades | | Masa | Desig |
|-------------------------|-----|----|----------------------|-------|------------------------------|-------------------------|------------------|------|-------|
| d | D | B | C | C_0 | | Velocidad de referencia | Velocidad límite | | |
| mm | | | kN | | kN | rpm | kg | - | |
| 240 | 360 | 92 | 1290 | 2080 | 176 | 1500 | 1900 | 33,5 | 23048 |



Factores de cálculo
 $e = 0,23$
 $Y_1 = 2,9$
 $Y_2 = 4,4$
 $Y_0 = 2,8$

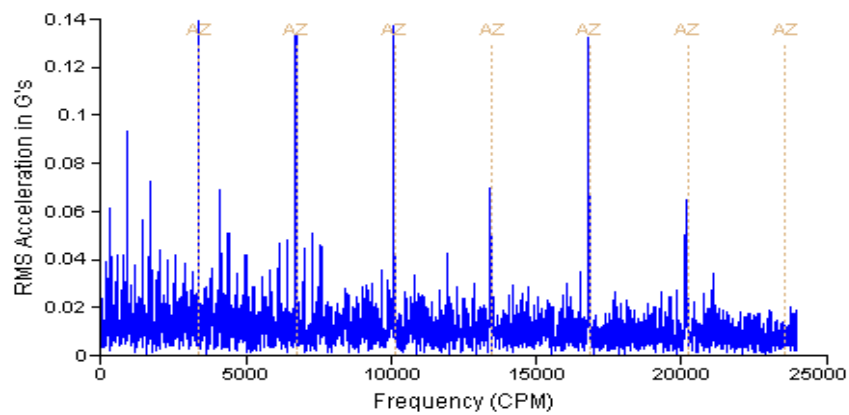
Estudio Análisis Vibracional del reductor de la bomba

Tendencia y espectro de frecuencias de BPFO



Overall Value

23/12/2011
 05:44:36 a.m.
 Amp: 0.741



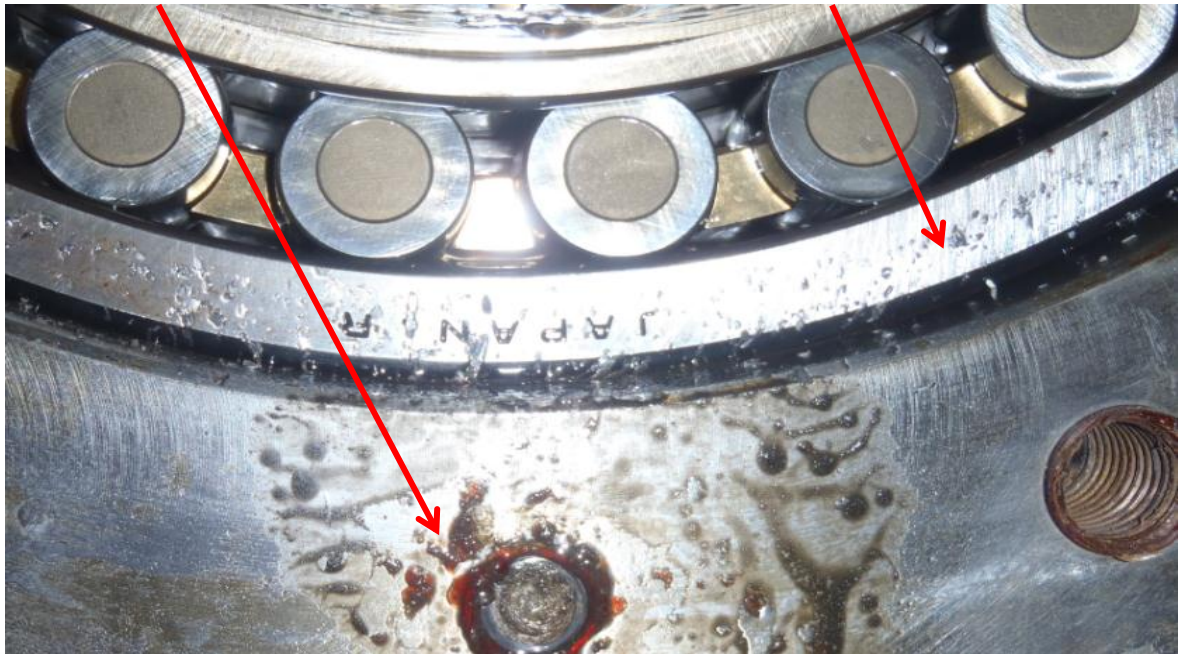
23/12/2011 05:44:36 a.m.

Route
 Peakvue
 HP 500 Hz
 0.741 A -DG
 LOAD = 100.00
 RPM = 268.00
 (4.800 Hz)
 Gearbox1
 Shaft3
 NSK 23048CAM
 AZ-BPFO
 3369.6 CPM

Análisis de rodamiento después de desmontaje

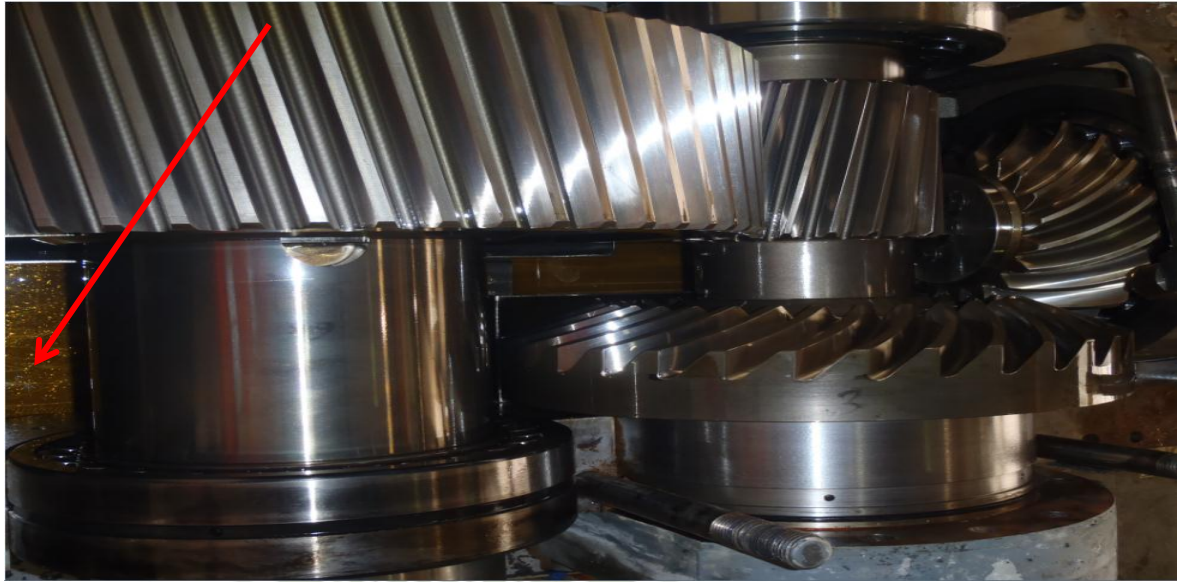
Rodamiento 23048

En el desmontaje se observó abundantes partículas metálicas (limallas)



Reductor de BB PP101

En el fondo de la caja se observó el aceite contaminado con abundante partículas (limallas de bronce)

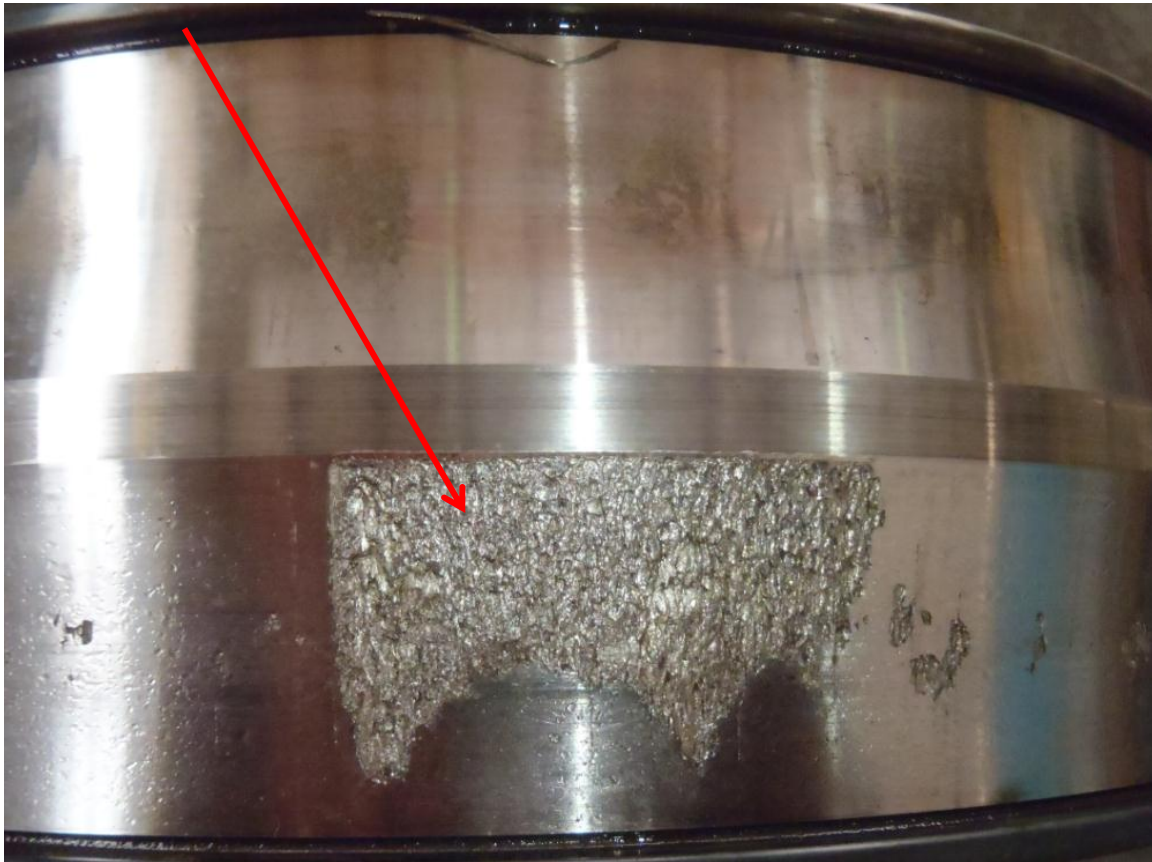


PP101 – Reductor

No se observo tendencias ni parámetros anormales en los reportes de los análisis de aceite.

| Muestra | Codigo | Comp | Fecha Muestra | Acum >30u | Acum >25u | Cod.ISO >14u | Cod.ISO >6u | Agua, %p | Al, ppm | Cr, ppm | Cu, ppm | Fe, ppm | Pb, ppm | Si, ppm | Sn, ppm | Visc100°C, cSt | Visc40°C, cSt | DF, ppm | OBSERVACIONES |
|----------|---------------|------|---------------|-----------|-----------|--------------|-------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------------|---------|---------------|
| AAO 1928 | 703C3310PP101 | M275 | 12/07/2011 | 32 | 38 | 13 | 14 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 25.8 | 203.8 | | |
| AAO 2539 | 703C3310PP101 | M275 | 28/07/2011 | 5 | 12 | 14 | 18 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 25.8 | 204.3 | | |
| AAO 3200 | 703C3310PP101 | M275 | 15/08/2011 | 20 | 35 | 15 | 18 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 25.7 | 204.2 | | |
| AAO 3666 | 703C3310PP101 | M275 | 28/08/2011 | 20 | 39 | 15 | 17 | 0.0 | 0 | 0.0 | 1 | 3 | 2 | 7 | 0 | 25.8 | 206.1 | | |
| AAO 4244 | 703C3310PP101 | M275 | 08/09/2011 | 10 | 22 | 14 | 16 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 2 | 4 | 2 | 0 | 25.8 | 205.5 | | |
| AAO 6091 | 703C3310PP101 | M275 | 10/11/2011 | 16 | 33 | 15 | 17 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 6 | 4 | 4 | 0 | 25.8 | 204.6 | 0 | |
| AAO 6323 | 703C3310PP101 | M275 | 17/11/2011 | 18 | 25 | 13 | 15 | 0.0 | 0 | 0.1 | 0 | 6 | 4 | 3 | 0 | 25.6 | 202.1 | 3 | |
| AAO 6349 | 703C3310PP101 | M275 | 19/11/2011 | 136 | 454 | 19 | 21 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 4 | 3 | 7 | 0 | 25.7 | 204.8 | 1 | |
| AAO 6444 | 703C3310PP101 | M275 | 21/11/2011 | 15 | 20 | 13 | 15 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 7 | 5 | 3 | 0 | 25.7 | 202.1 | 1 | |
| AAO 6752 | 703C3310PP101 | M275 | 02/12/2011 | 32 | 52 | 14 | 18 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 7 | 3 | 3 | 0 | 25.7 | 203.6 | 2 | |
| AAO 7470 | 703C3310PP101 | M275 | 16/12/2011 | 30 | 37 | 14 | 17 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 9 | 4 | 4 | 1 | 25.8 | 201.6 | 3 | |
| AAO 7527 | 703C3310PP101 | M275 | 20/12/2011 | 8 | 29 | 15 | 19 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 9 | 3 | 3 | 0 | 25.7 | 205.8 | 2 | |
| AAO 7605 | 703C3310PP101 | M275 | 22/12/2011 | 62 | 89 | 15 | 18 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 10 | 4 | 4 | 0 | 25.8 | 208.4 | 3 | |

Rodamiento No.23048 Pista interior presenta descamación severa en una hilera



Rodamiento No.23048 Pista exterior presenta descamación severa en una hilera solo un sector





ANEXO II – ANALISIS POLEA LADO IZQUIERDO – FAJA

ANEXO II – ANALISIS POLEA LADO IZQUIERDO - FAJA

| | |
|----------------------------|---|
| Datos del equipo: | Faja Transportadora |
| Componente: | Polea de 6 - Faja |
| Antecedentes: | Se reportó lo siguiente: <ul style="list-style-type: none">• Presenta tendencia a incremento en velocidad de vibración 2.003 mm/s.• En la onda en el tiempo muestra golpes a la frecuencia de falla BPFO.• En el espectro de Peakvue muestra frecuencia de falla BPFO definido. |
| Evaluación del componente: | La recomendación fue prever el cambio del componente, el equipo quedo en seguimiento Cuando se evaluó el componente se encontró el Rodamiento Izquierdo con desgaste en las pistas exterior e interior, marcas pronunciadas de los elementos rodantes en la zona de carga, juego radial 0.60 mm. Normal 0.25 mm. Rodamiento derecho con desgaste en las pistas exterior e interior, juego radial 0.40 mm. Normal 0.25 mm. Nivel de daño 2. |
| Posibles causas: | Sobrecarga y contaminación del lubricante con silice. |

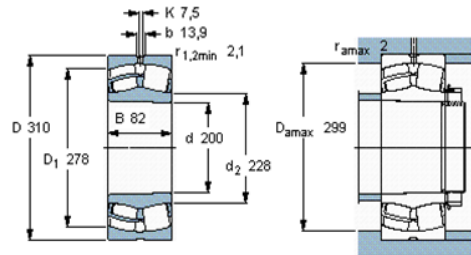
Rodamientos Chumacera Izquierda 2304CCK/W33

[Visión 3D](#) [PDF](#) [CAD](#) [IMP](#) [Imprimir](#) [Cerrar](#)

Rodamientos de rodillos a rótula, agujero cilíndrico y cónico, agujero cónico, no están obturados

Tolerancias, ver también el texto
 Juego radial interno, agujero cilíndrico, agujero cónico, no están obturados, ver también el texto
 Ajustes recomendados
 Tolerancias del eje y del alojamiento

| Dimensiones principales | | | Capacidades de carga dinámica | | Carga límite de fatiga | Velocidades | | Masa | Designación |
|-------------------------|-----|----|-------------------------------|----------------|------------------------|-------------------------|------------------|------|----------------|
| d | D | B | C | C ₀ | P _u | Velocidad de referencia | Velocidad límite | | |
| mm | | | kN | | kN | rpm | | kg | - |
| 200 | 310 | 82 | 1000 | 1530 | 137 | 1800 | 2200 | 22,6 | 23040 CCKW33 * |



Factores de cál
 e 0,24
 Y₁ 2,8
 Y₂ 4,2
 Y₀ 2,8

Agujero cónico, conicidad
1: 12

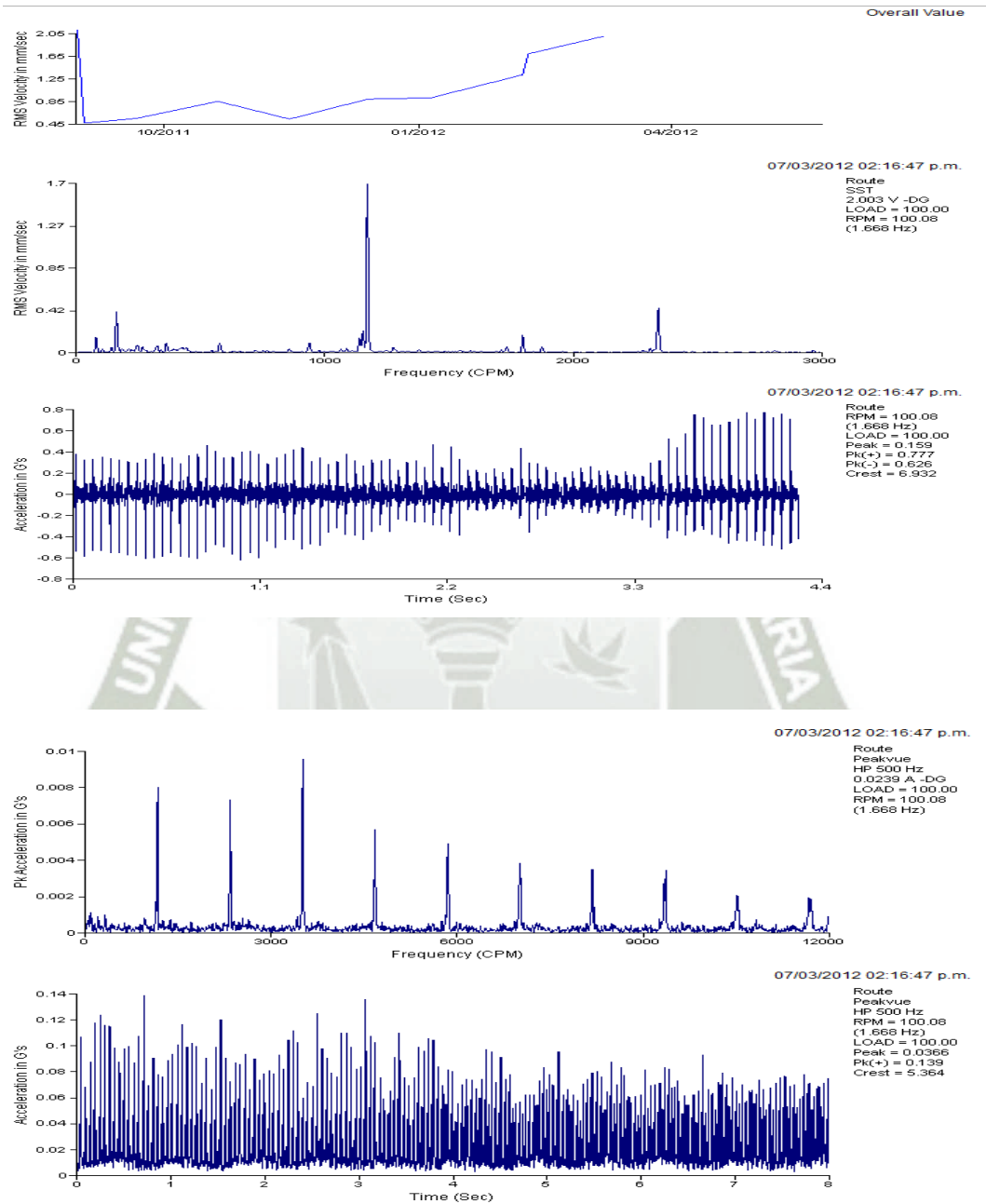
Juego Radia Interno de Rodamiento 2304CCK/W33

Tabla 3: Juego radial interno de los rodamientos de rodillos a rótula con agujero cónico



| Diámetro del agujero d más de | incl. | Juego radial interno | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|----------------------|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | C2 | | Normal | | C3 | | C4 | | C5 | |
| mm | | min | máx | min | máx | min | máx | min | máx | min | máx |
| | | µm | | | | | | | | | |
| 24 | 30 | 20 | 30 | 30 | 40 | 40 | 55 | 55 | 75 | - | - |
| 30 | 40 | 25 | 35 | 35 | 50 | 50 | 65 | 65 | 85 | 85 | 105 |
| 40 | 50 | 30 | 45 | 45 | 60 | 60 | 80 | 80 | 100 | 100 | 130 |
| 50 | 65 | 40 | 55 | 55 | 75 | 75 | 95 | 95 | 120 | 120 | 160 |
| 65 | 80 | 50 | 70 | 70 | 95 | 95 | 120 | 120 | 150 | 150 | 200 |
| 80 | 100 | 55 | 80 | 80 | 110 | 110 | 140 | 140 | 180 | 180 | 230 |
| 100 | 120 | 65 | 100 | 100 | 135 | 135 | 170 | 170 | 220 | 220 | 280 |
| 120 | 140 | 80 | 120 | 120 | 160 | 160 | 200 | 200 | 260 | 260 | 330 |
| 140 | 160 | 90 | 130 | 130 | 180 | 180 | 230 | 230 | 300 | 300 | 380 |
| 160 | 180 | 100 | 140 | 140 | 200 | 200 | 260 | 260 | 340 | 340 | 430 |
| 180 | 200 | 110 | 160 | 160 | 220 | 220 | 290 | 290 | 370 | 370 | 470 |
| 200 | 225 | 120 | 180 | 180 | 250 | 250 | 320 | 320 | 410 | 410 | 520 |

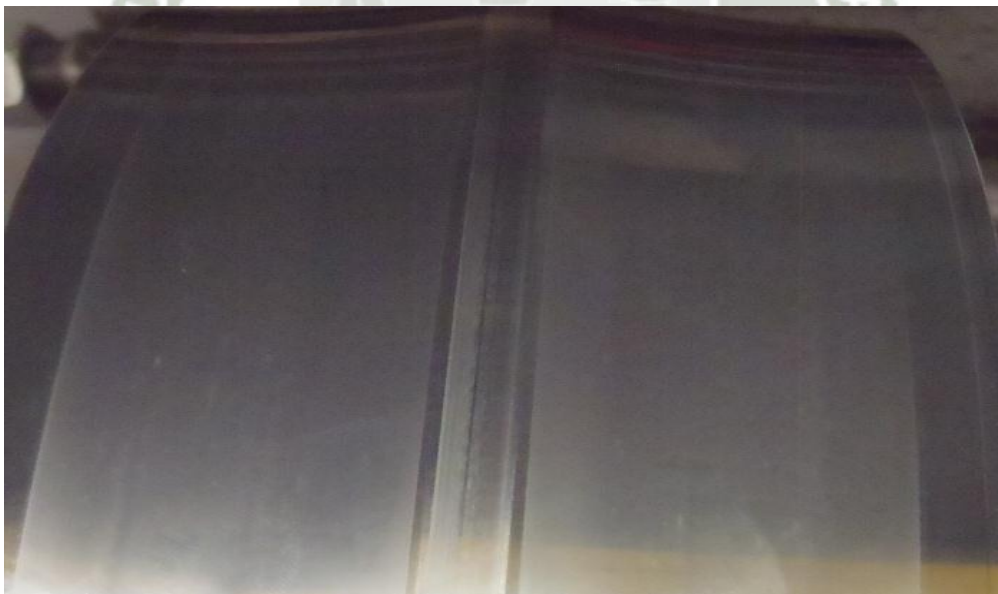
Estudio Análisis Vibracional Polea 6 – Faja Transportadora



Estudio Polea Pista interior y exterior presenta alto desgaste abrasivo y marcas de elementos rodantes.



Pista exterior



Pista interior



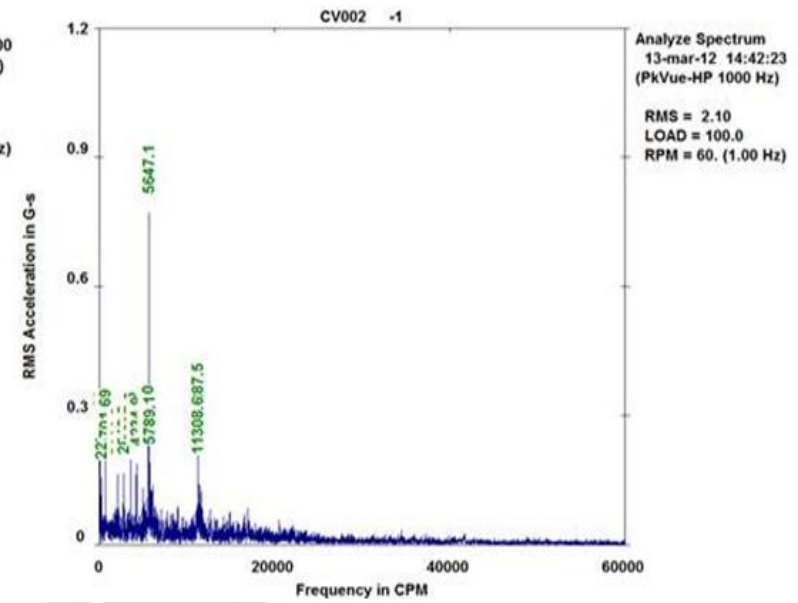
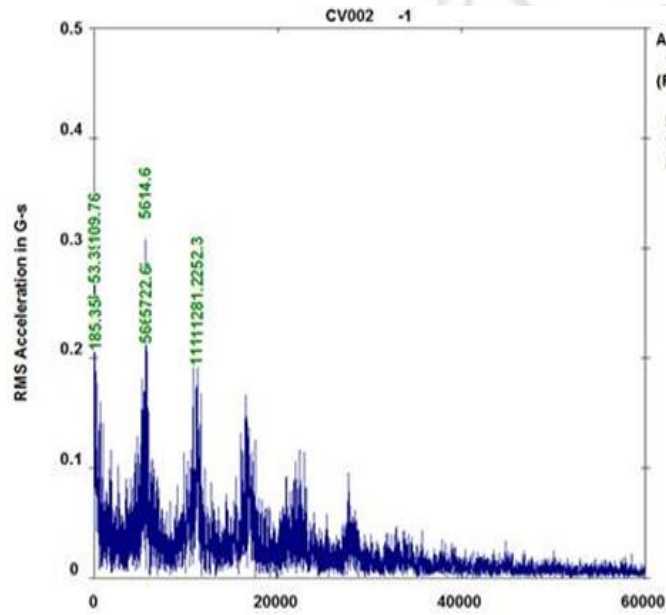
ANEXO III – ANALISIS RODAMIENTO MOTOR – FAJA

ANEXO III – ANALISIS RODAMIENTO MOTOR - FAJA

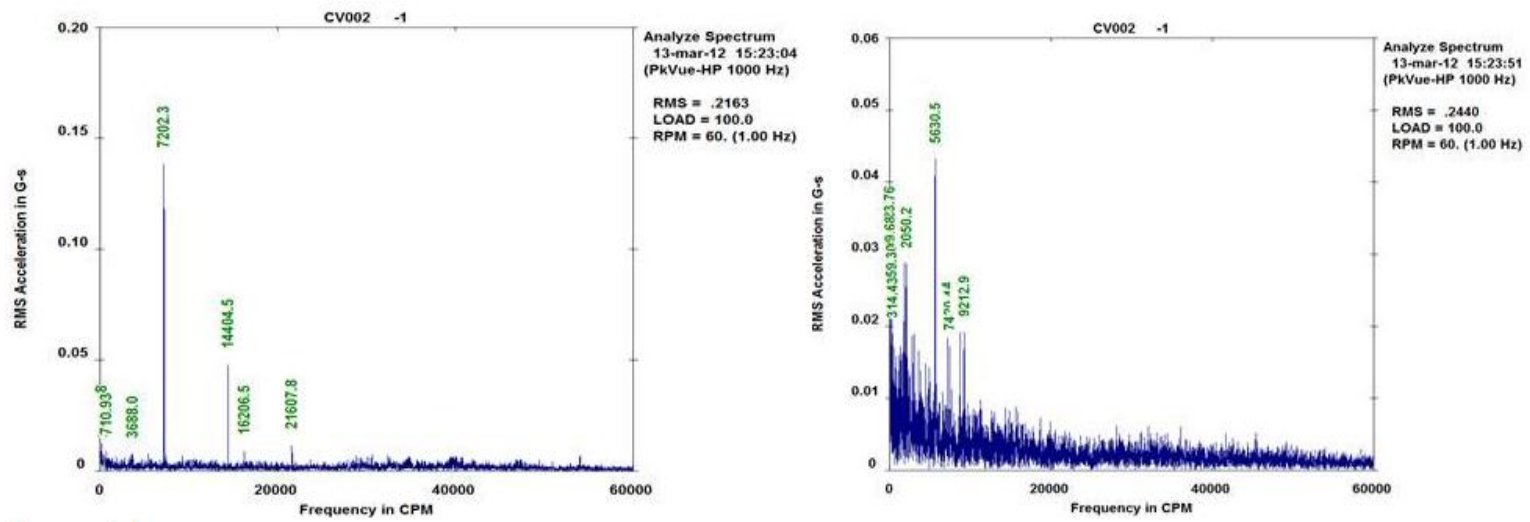
| | |
|----------------------------|---|
| Datos del equipo: | Faja Transportadora |
| Componente: | Motor |
| Antecedentes: | <p>Se reportó lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durante el primer arranque el 13 de marzo se escuchó alto ruido en ambos rodamientos, se procedió a realizar la toma de vibraciones estando en valores de 2.4 y 2.1 G's de amplitud global (amplitud de onda de 17 y 15 G's pico), el espectro indica problemas de lubricación y presencia de frecuencias de falla del rodamiento. • Se lubrico ambos rodamientos obteniendo valores de 0.21 y 0.24 G's respectivamente, el espectro de rodamiento lado acople continua mostrando una frecuencia correspondiente a l BPFO. (5630 cpm). • El 14 de marzo se volvió a arrancar el equipo, se volvió a escuchar el sonido de fricción y luego de unos 5 minutos de trabajo desapareció, volviéndose a monitorear los valores tomados en este momento eran de 0.39 y 0.49 G's, se volvió a lubricar. Los valores tomados luego de esta lubricación fueron de 0.21 y 0.14 G's. (amplitud de onda de 2.3 y 1.4 G's) respectivamente. • Finalmente al momento de apagar el motor se volvió a escuchar el sonido de fricción en el rodamiento del lado acople. |
| Evaluación del componente: | se observó pequeñas marcas de fricción en la pista exterior. |
| Posibles causas: | Contaminación, Errores de montaje, |

Estudio Análisis Vibracional Reductor Izquierdo

Espectros antes de la lubricación



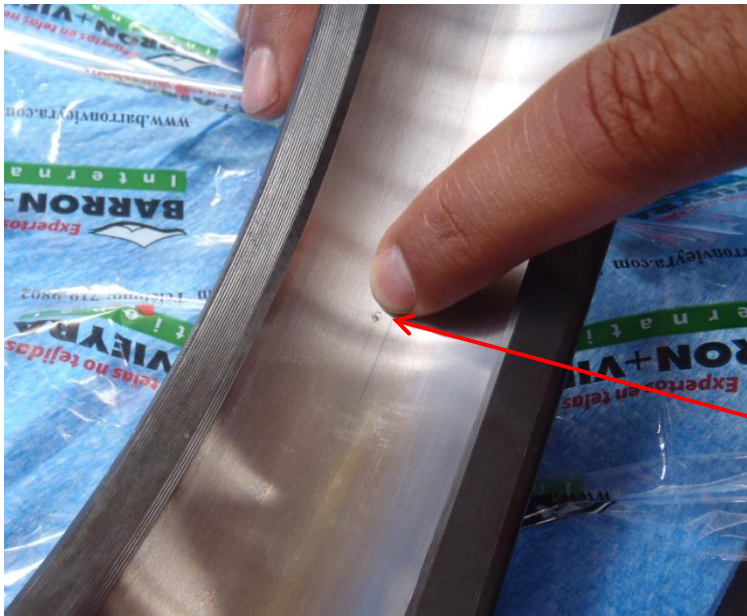
Espectros después de la lubricación



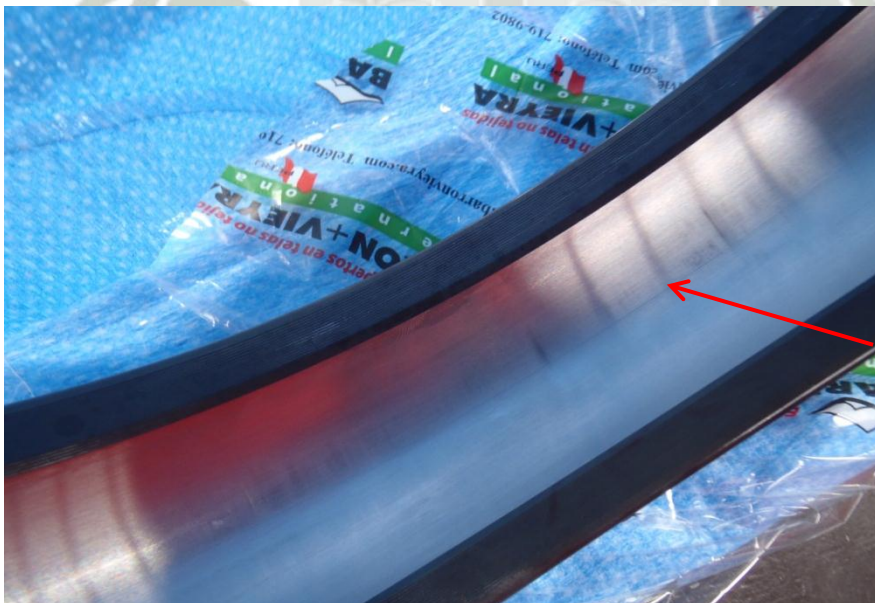
Recomendaciones

- Inspeccionar lubricadores y líneas de lubricación y alojamientos de los rodamientos a fin de determinar la procedencia del sonido (fricción) y evitar problemas de lubricación a futuro.

Estudio Rodamiento Motor



Daño en la pista

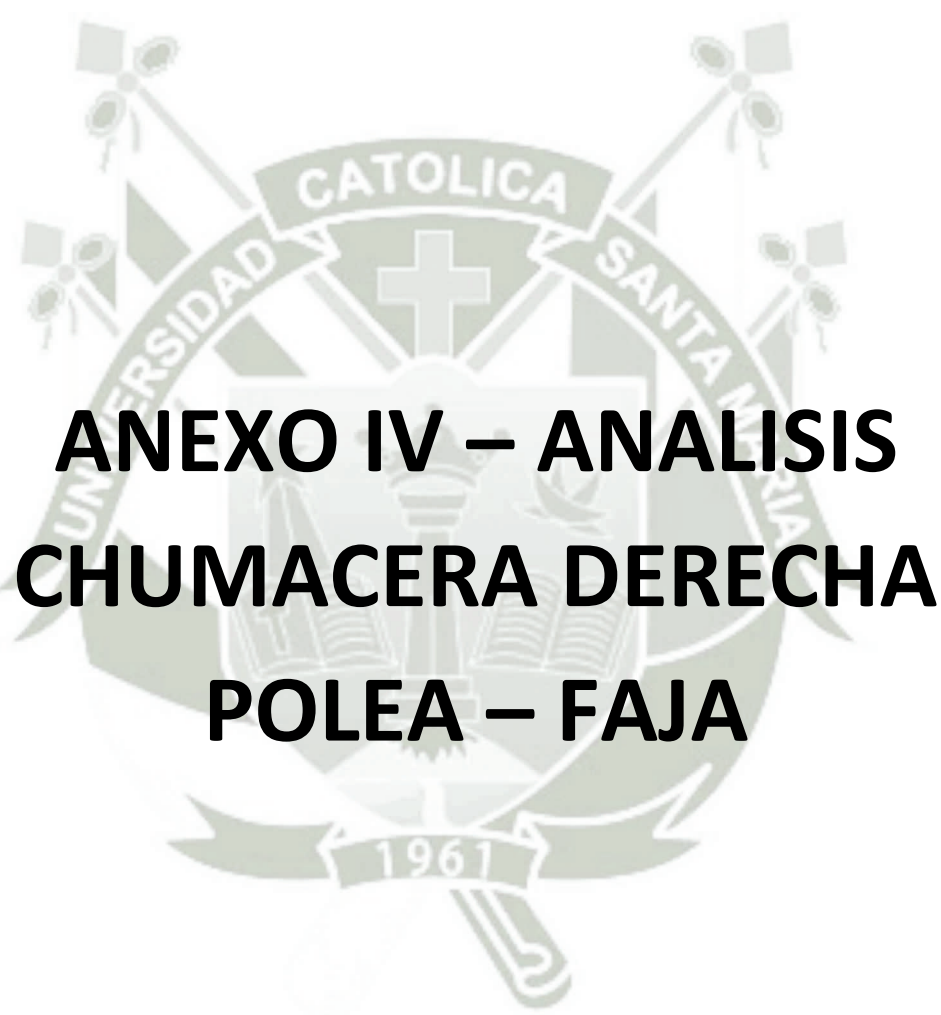


**Rodamiento marcas
desgaste abrasivo**



Ingreso de Humedad al motor





**ANEXO IV – ANALISIS
CHUMACERA DERECHA
POLEA – FAJA**

ANEXO IV – ANALISIS CHUMACERA DERECHA POLEA - FAJA

| | |
|----------------------------|---|
| Datos del equipo: | Faja Transportadora |
| Componente: | Chumacera derecha polea de cola |
| Antecedentes: | Se reportó lo siguiente: <ul style="list-style-type: none">• Desde el 31 de Agosto se reportó alta vibración en peakvue y tendencia creciente de la onda en el tiempo, el 08 de Noviembre se recomendó cambiar ambos rodamientos de la polea de cola.• El 15 de Diciembre se cambió la polea con sus respectivas chumaceras. |
| Evaluación del componente: | Al desmontar el rodamiento lado derecho se encontró la pista exterior con desgaste abrasivo considerable en la zona de carga, así mismo se observó que las superficies de las dos hileras de la pista interior muestra deterioro en forma de ondulaciones. |
| Posibles causas: | Penetración de contaminación, deficiente lubricación, vibración continua. |

Rodamiento FAG 23134E1AK.M.C3 Características

Designation: **23134 E1AK.M.C3**
 Type: *Radial Spherical Roller Bearings. Multi row. Complete. (170X280X88).*

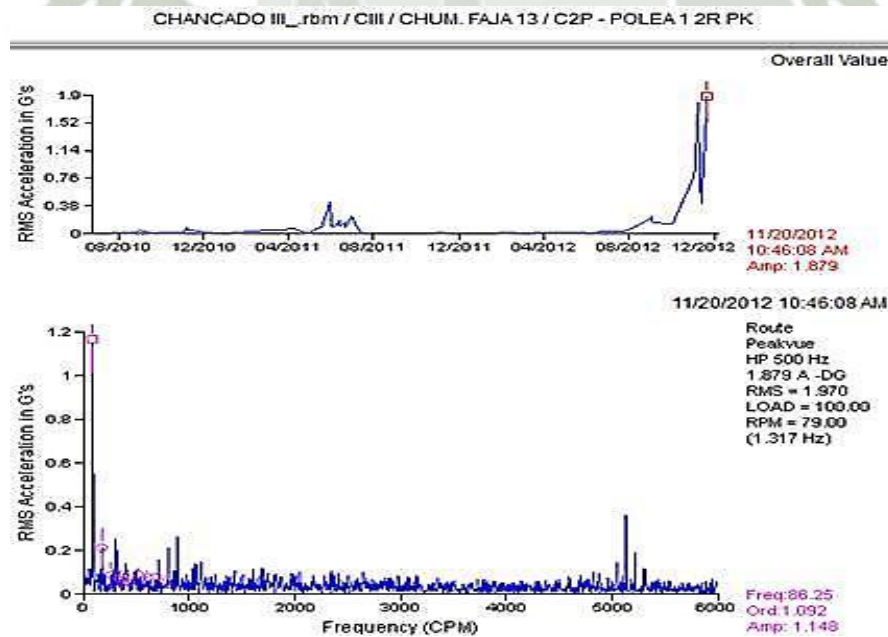
Main dimensions:

| d ^{mm} / _{Inch} | D ^{mm} / _{Inch} | B ^{mm} / _{Inch} | d1 ^{mm} / _{Inch} | Mass ^{kg} / _{lb} ² |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|
| 170.000 | 280.000 | 88.000 | 195.000 | 20.600 |
| 6.6929 | 11.0237 | 3.4646 | 7.6772 | 45.420 |

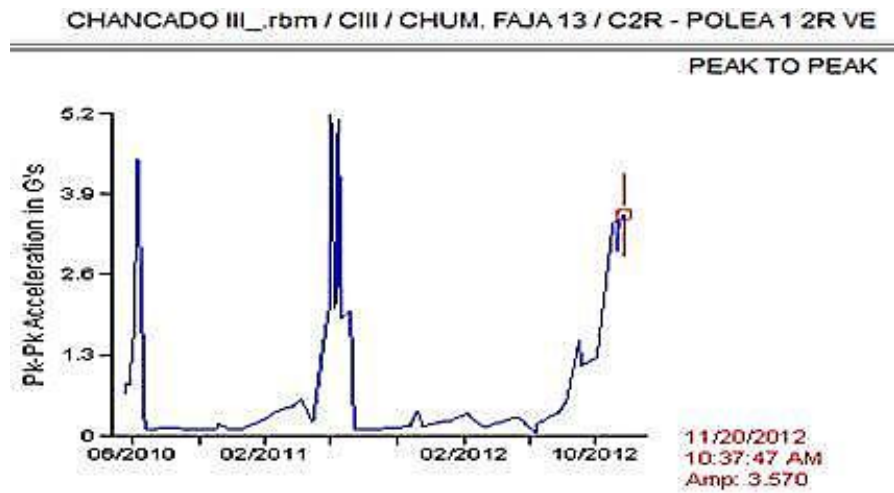
Drawing ³:

Estudio Analisis Vibracional Polea de Cola – Faja Transportadora

Tendencia y espectro de frecuencia del peakvue



Tendencia de Onda de tiempo



Estudio Rodamiento Polea de Cola – Faja Transportadora



Pista Interior, presenta deterioro, ondulaciones en toda la superficie de las 2 hileras



Pista exterior presenta deterioro ondulaciones en la zona de carga

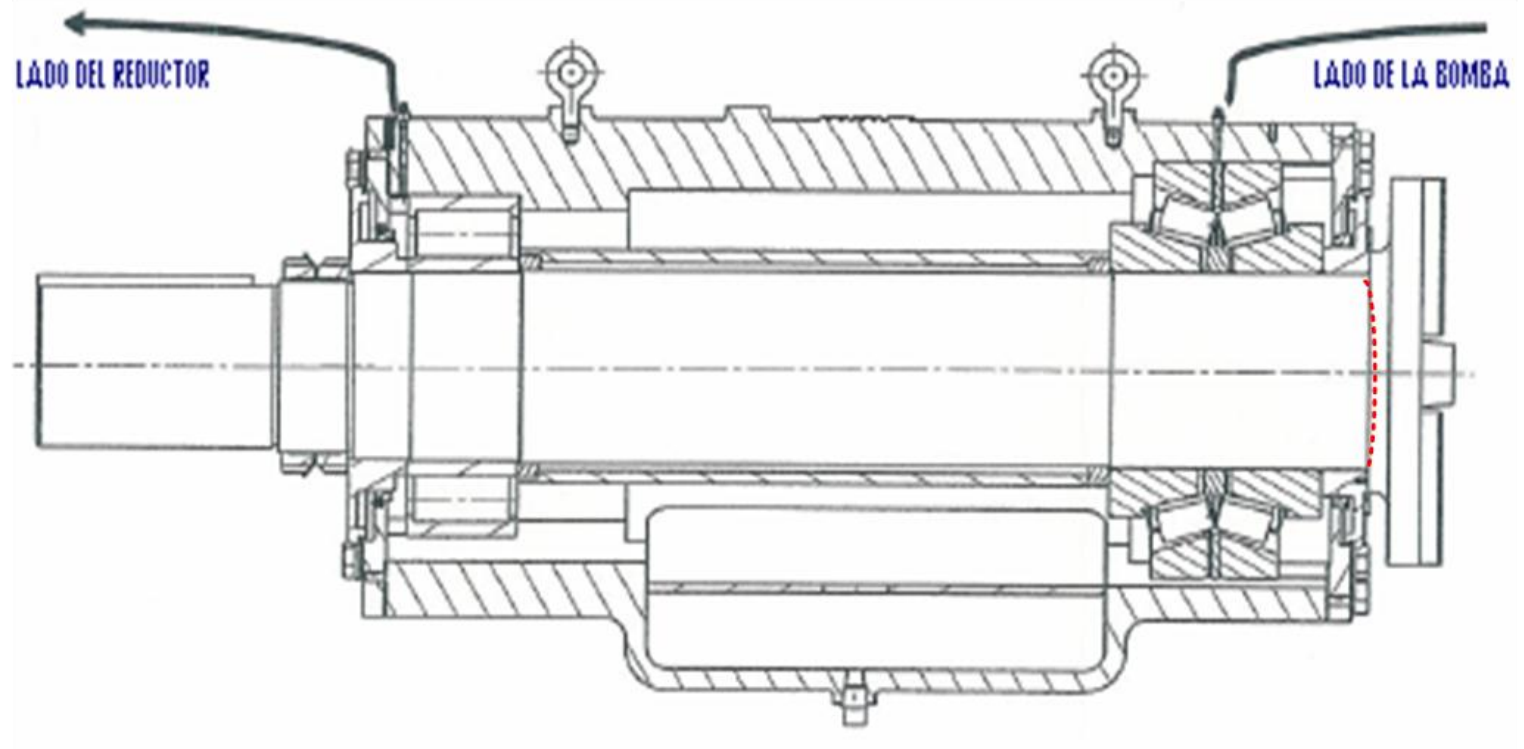


ANEXO V – ANALISIS CAJA PORTA RODAMIENTOS – BOMBA

ANEXO V – ANALISIS CAJA PORTA RODAMIENTOS - BOMBA

| | |
|----------------------------|---|
| Datos del equipo: | Bomba |
| Componente: | Caja de Porta-rodamientos |
| Antecedentes: | Se ha reportado lo siguiente: <ul style="list-style-type: none">• Se reportó lo siguiente: el punto 10 de la botella continúa la tendencia creciente en peakvue y onda en el tiempo. Las amplitudes de BPFI y sus armónicos se mantienen dominantes en los espectros. Se recomienda mantener lubricado los rodamientos y programar su cambio. |
| Evaluación del componente: | <p>La pista interior del rodamiento cónico lado impulsor se encuentra con descamación severa en un punto de la pista en toda la longitud del elemento rodante.</p> <p>Los elementos rodantes, pistas y canastilla del rodamiento cónico lado bomba presentan sobrecalentamiento.</p> |
| Posibles causas: | Lubricación deficiente, sobrecarga |

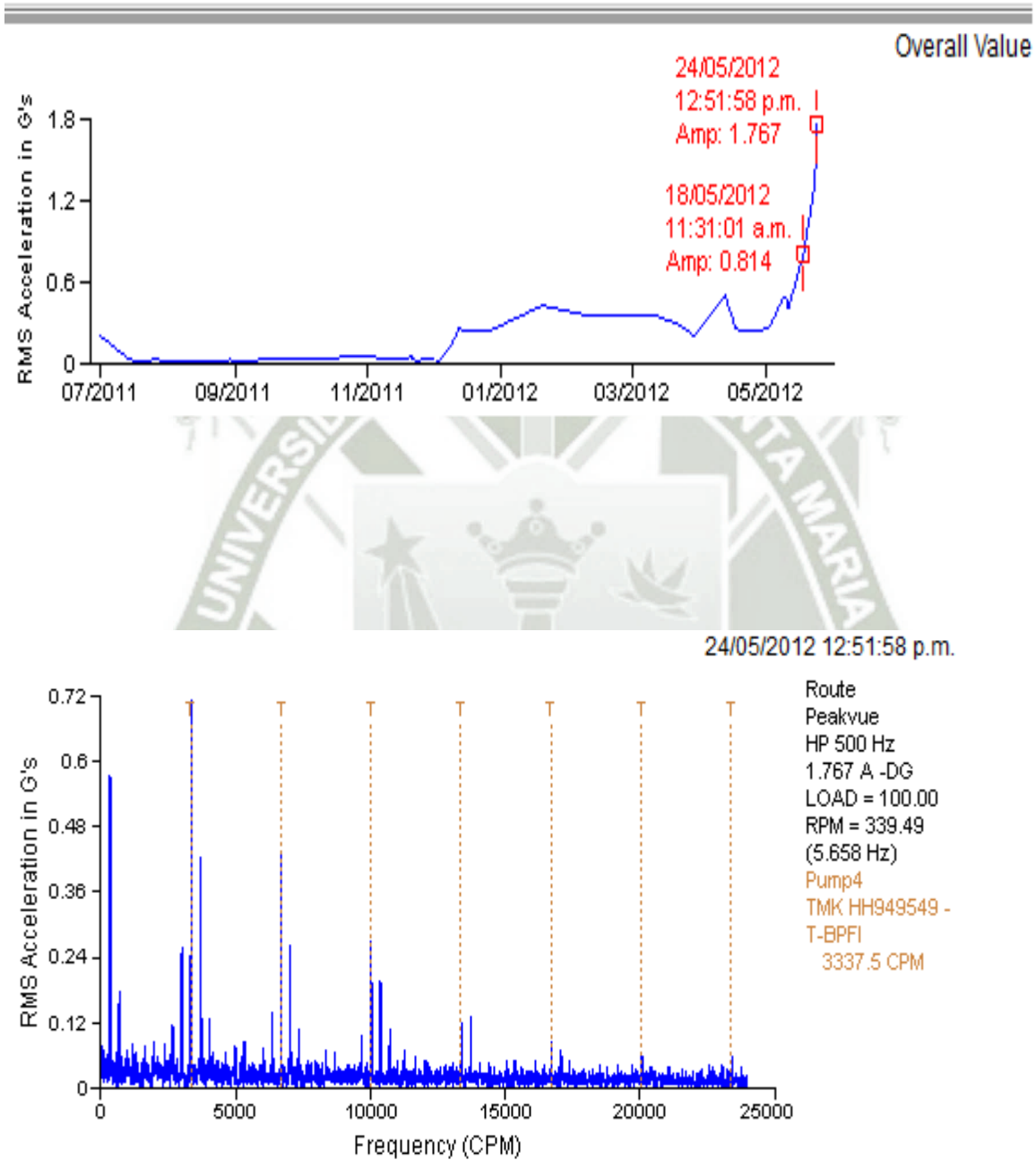
Estudio de Plano de caja porta rodamientos – Bomba Ciclones



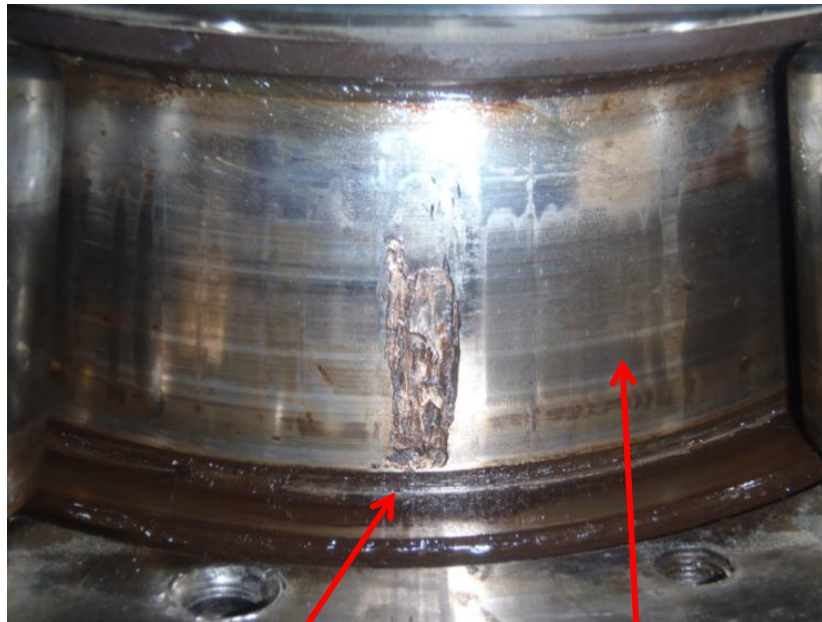
Estudio de Análisis Vibracional Botella Porta rodamientos

Tendencia de la vibración en peakvue y espectro de frecuencias del punto 10 Axial de la botella lado bomba

CONCE MOLIENDA FLOTACION II.rbm / 3310 / BOMBA 401 / 10P - 10APK

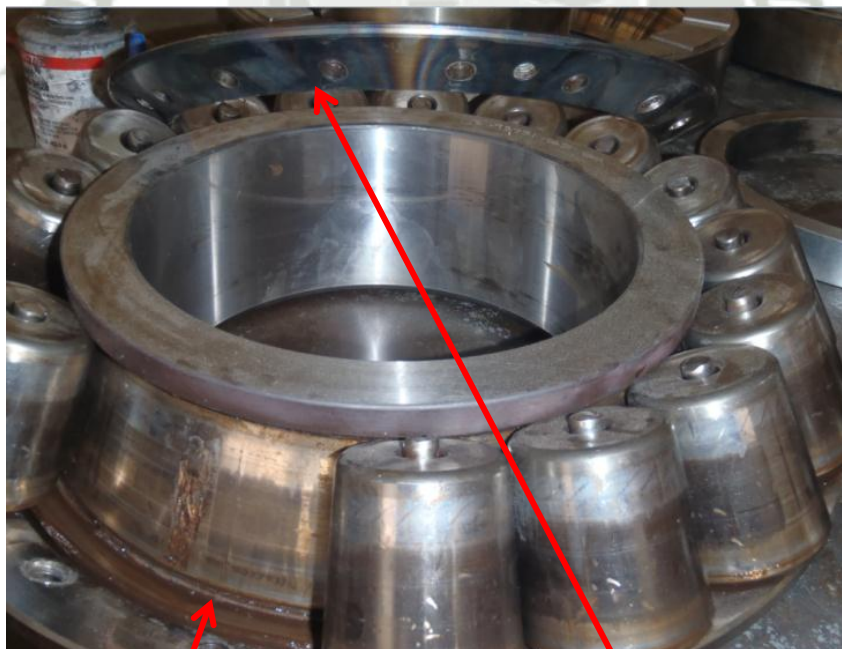


Estudio Porta rodamientos



Descamación

Sobrecalentamiento



Sobrecalentamiento

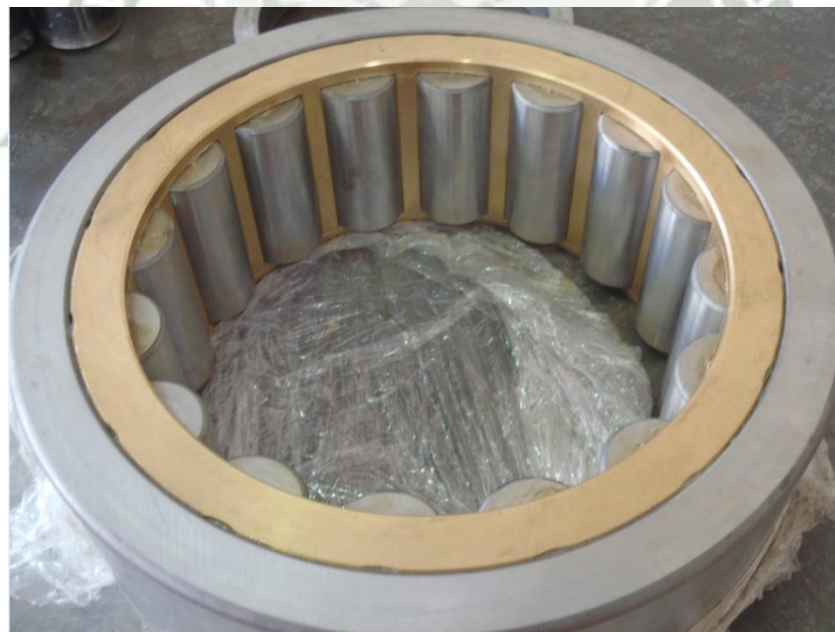
Rotura del aro de canastilla

Rodamiento Timken H936310





Botella de Rodamientos de rodillos cilíndricos lado acople presenta deslizamiento en la superficie del agujero (soltura)

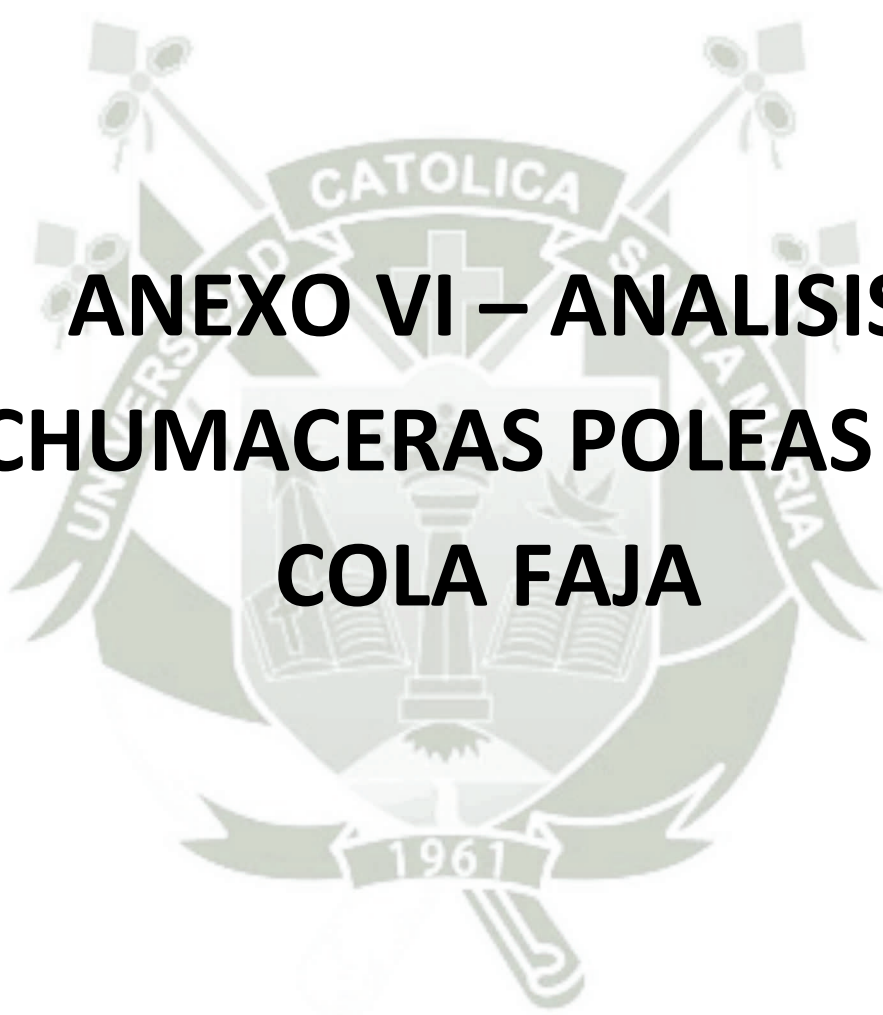




Botella porta rodamientos de rodillos cilíndricos lado acople presenta corrosión por contacto y deslizamiento circular en la superficie del agujero







ANEXO VI – ANALISIS CHUMACERAS POLEAS DE COLA FAJA

ANEXO VI – ANALISIS CHUMACERAS POLEAS DE COLA FAJA

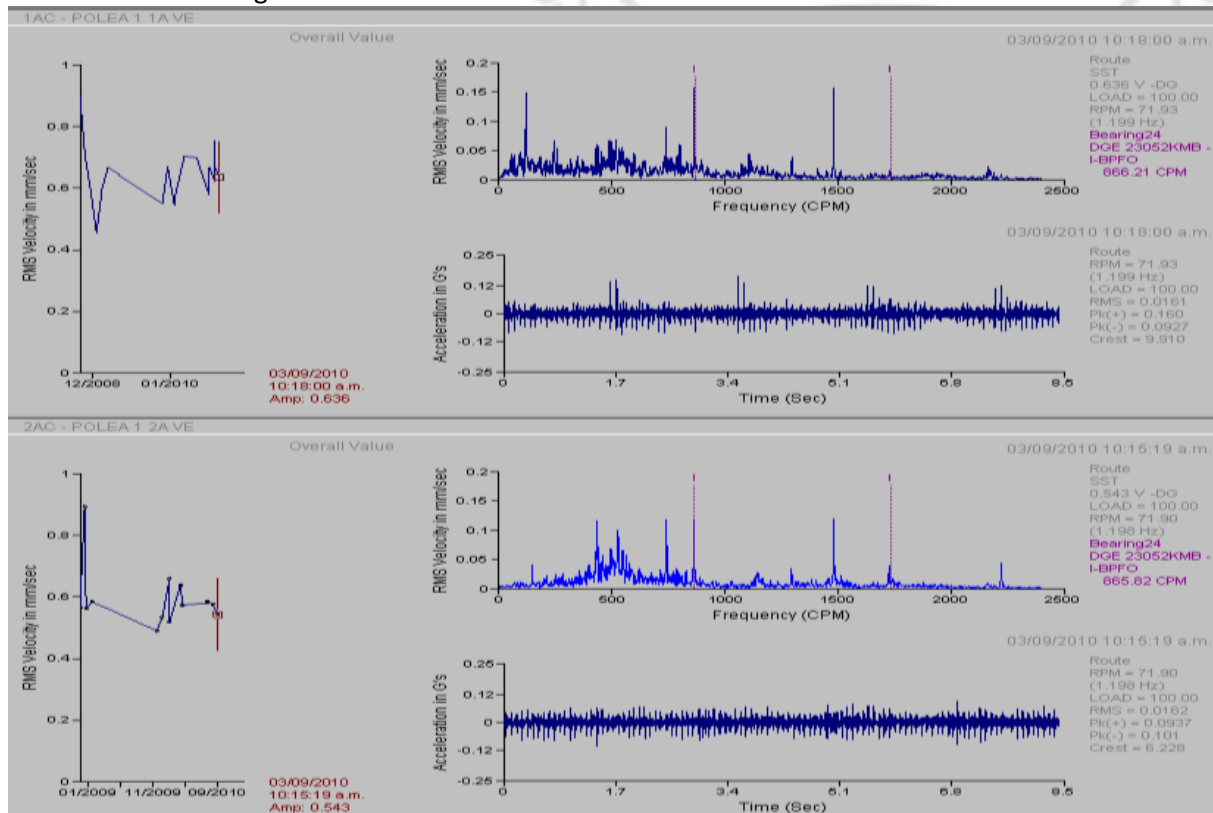
| | |
|----------------------------|--|
| Datos del equipo: | Faja Transportadora |
| Componente: | Chumacera de Polea de Cola |
| Antecedentes: | <p>Las chumaceras de esta polea se inspeccionan por análisis vibracional con una frecuencia de 20 días. El 11 de agosto se reporta como advertencia presencia BPFO (frecuencia de falla de pista exterior) en ambas chumaceras. Se emite un nuevo reporte el día 03 de septiembre ratificando el anterior y esta vez se reporta FTF (frecuencia de falla de canastilla).</p> <p>El 28 de octubre, se cambia el componente encontrando evidencias de falla.</p> |
| Evaluación del componente: | <p>Desmontando el componente se encontraron indicaciones en el rodamiento de la polea de cola</p> <p>Pista externa - Marcas de trabajo: Carga radial, rotación del anillo interno.</p> <p>Rodillos – Marcas de trabajo: Carga radial, rotación del anillo interno</p> <p>Pista interior – Marcas de trabajo: Carga radial, rotación del anillo interno</p> |
| Posibles causas: | Lubricación deficiente, sobrecarga |

Estudio de Análisis Vibracional Chumacera Polea de Cola

Faja Polea:

Las chumaceras de la polea lados izquierdo y derecho continúan presentando frecuencias de falla de rodamiento (BPFO), teniendo en cuenta que la chumacera lado izquierdo presenta mayor amplitud. En la forma de onda se observan golpes a BPFO y a 30CPM (FTF).

Recomendación: Programar cambio de rodamientos.



Estudio Chumacera Polea de cola Faja

El análisis de los elementos recuperados observamos lo siguiente.

Rodamiento Izquierdo

Pista externa

- Marcas de trabajo: Carga radial, rotación del anillo interno.
- Falla del elemento rodante: Deterioro de la superficie por fricción de deslizamiento entre la superficie de la pista, elementos rodantes, rodillos.
- Causas probables: Ingreso de impurezas, lubricante deficiente, movimiento irregular de los elementos.





Rodillos

- Marcas de trabajo: Carga radial, rotación del anillo interno.
- Falla del elemento rodante: Descamación prematura que ocurrió a lo largo de los elementos; ralladuras en la cara de los elementos rodantes.
- Causas probables: Carga excesiva, falla en la instalación (des alineamiento), carga de momento, contaminación por partículas o por agua, lubricación deficiente, lubricante inadecuado, juego incorrecto, deficiencia en la precisión del eje y del alojamiento.



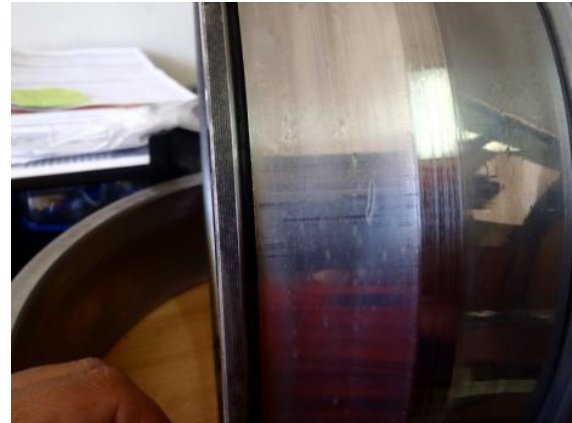




Pista Interior

- Marcas de trabajo: Carga radial, rotación del anillo interno
- Falla del elemento: Ligeras abolladuras o indicaciones en la superficie del elemento

- Causas probables: Contaminación por partículas metálicas, carga excesiva, impactos durante el transporte o instalación.





ANEXO VII – ANALISIS REDUCTOR DERECHO FAJA TRANSPORTADORA

ANEXO VII – ANALISIS REDUCTOR DERECHO FAJA TRANSPORTADORA

1. Análisis Reductor Derecho Faja Transportadora

| | |
|-------------------|--|
| Datos del equipo: | Faja Transportadora |
| Componente: | Reductor Derecho |
| Antecedentes: | <p>15 Nov 2013.- Advertencia - En el reductor de la faja lado derecho se observa la tendencia creciente de los valores de peak vue y presencia de frecuencias de falla del rodamiento de la segunda reducción (BPFO) los espectros en su mayoría muestran alto ruido de piso que son indicativos de fricción interna de componentes, por otra parte se observa que este reductor está trabajando con un nivel de aceite diferente al del lado izquierdo y con presencia de fugas. Se recomienda verificar condiciones de lubricación y comunicar las acciones tomadas a fin de volver a monitorear y determinar condición de cambio del rodamiento.</p> <p>09 Ene 2014.- Continua tendencia creciente programar cambio de reductor.</p> <p>28 Ene 2014.- Alarma - Se observa un incremento severo del valor del peak vue en los ejes de alta del reductor y los espectros muestran alto ruido de piso en el espectro sin poder apreciarse frecuencias de falla en los rodamientos del primer y segundo eje. La tendencia de la forma de onda también muestra un incremento severo de hasta 41 G's pico-pico y presencia de golpes erráticos en la misma. Se recomienda cambiar rodamientos de reductor.</p> <p>30 Ene 2014.- Se realizó seguimiento del reductor derecho de faja, tendencia mantiene valores altos de vibración en peak vue, en primera y segunda reducción. En eje de baja, se encontró incrementado el valor de peak vue (0.89 G's rms), espectro mostrando ruido de piso.</p> |

Evaluación del componente: En la inspección del componente se encontró pérdida de material en la zona de rodadura en la pista externa e interna del rodamiento in board de la segunda reducción, los elementos rodantes muestran descascaramiento en menor severidad.

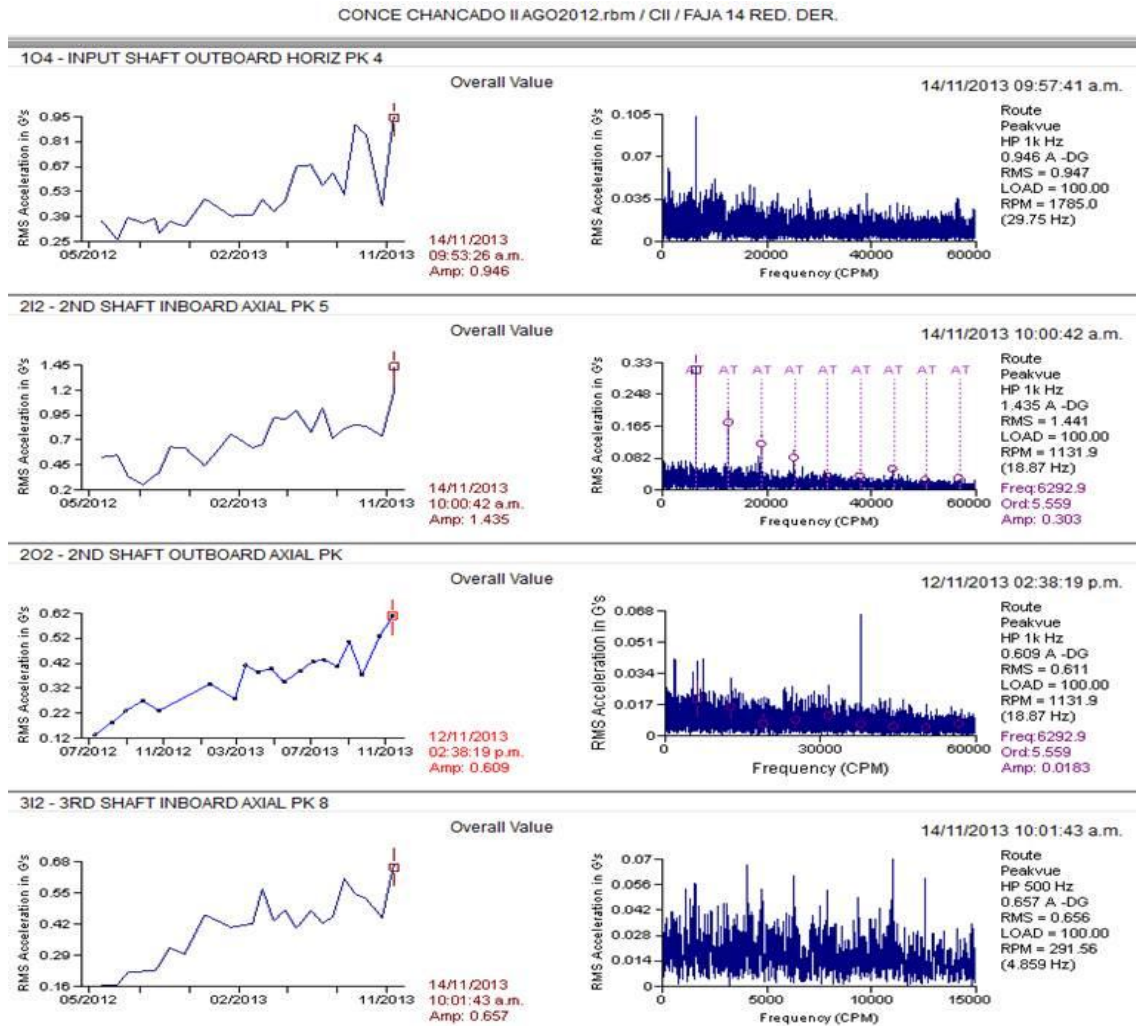
El alojamiento del rodamiento se encontró con ralladuras que evidencian un ligero giro de la pista externa.

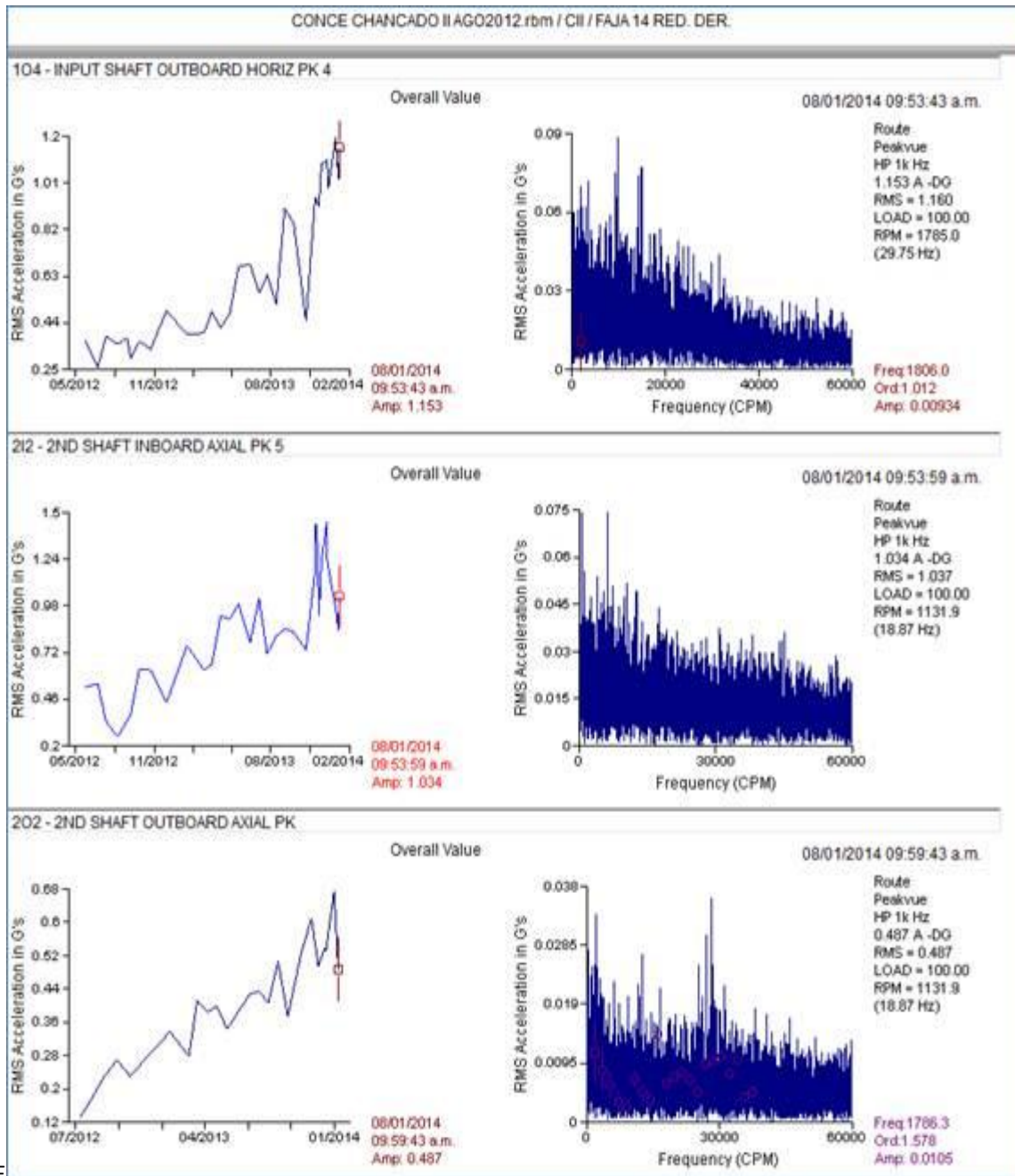
Posibles causas: Lubricación deficiente, sobrecarga



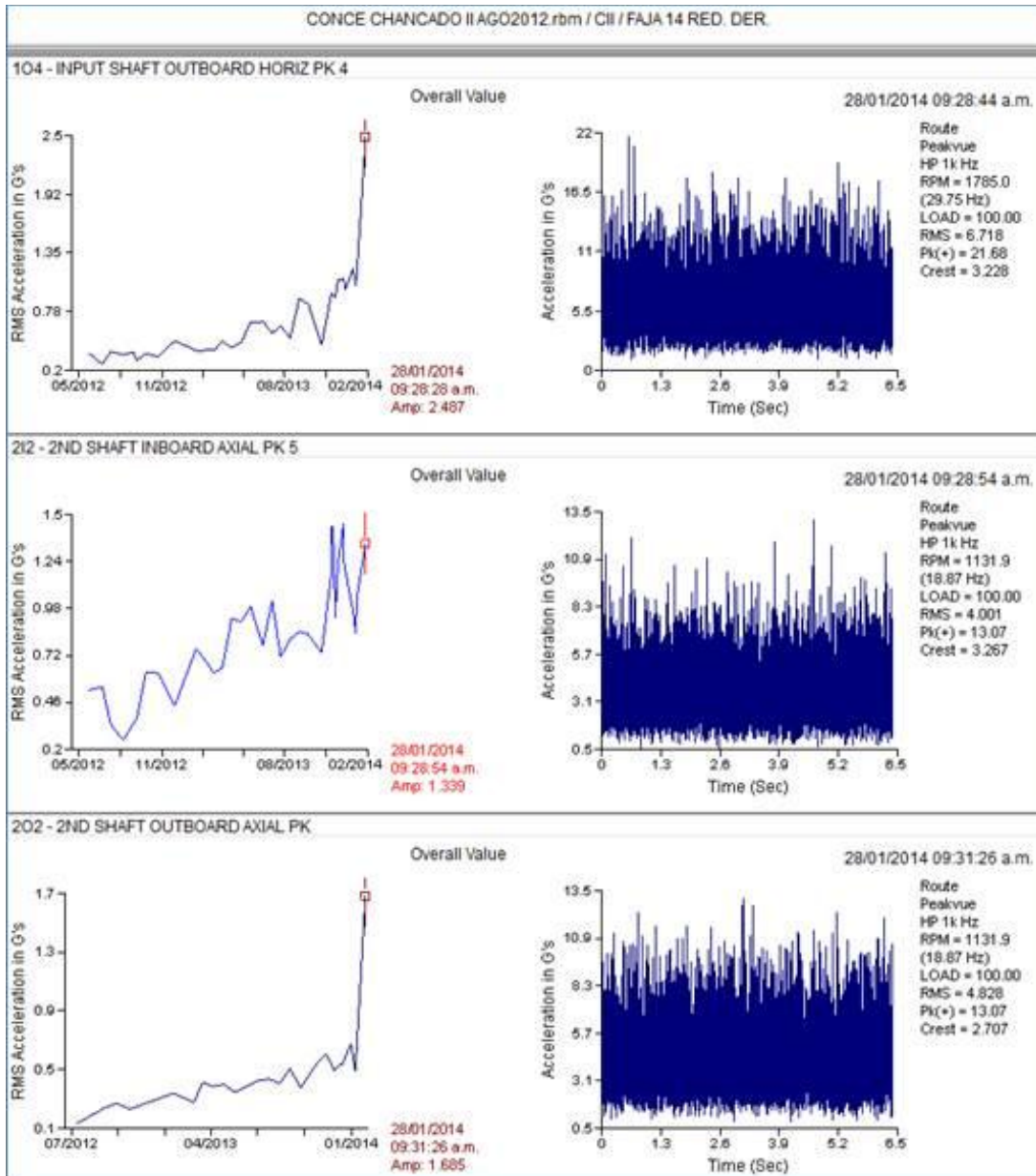
Estudio Analisis Vibracional Reductor derecho Faja 14

En reporte del 15 de Noviembre del 2013, se nota una tendencia creciente de Peak view en las tres primeras reducciones, el rodamiento se diferencia un resultado exacto de falla de BPFO.

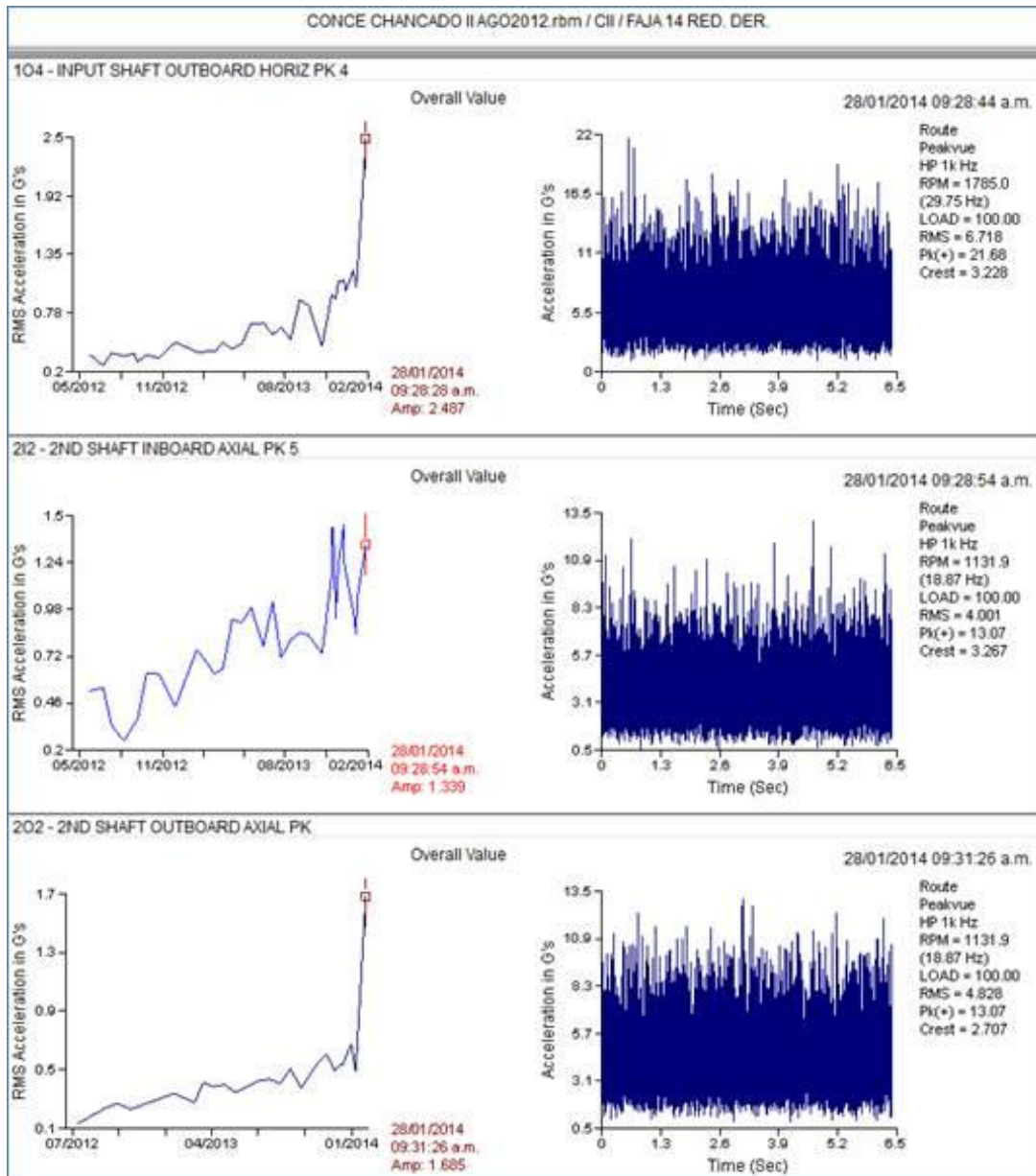


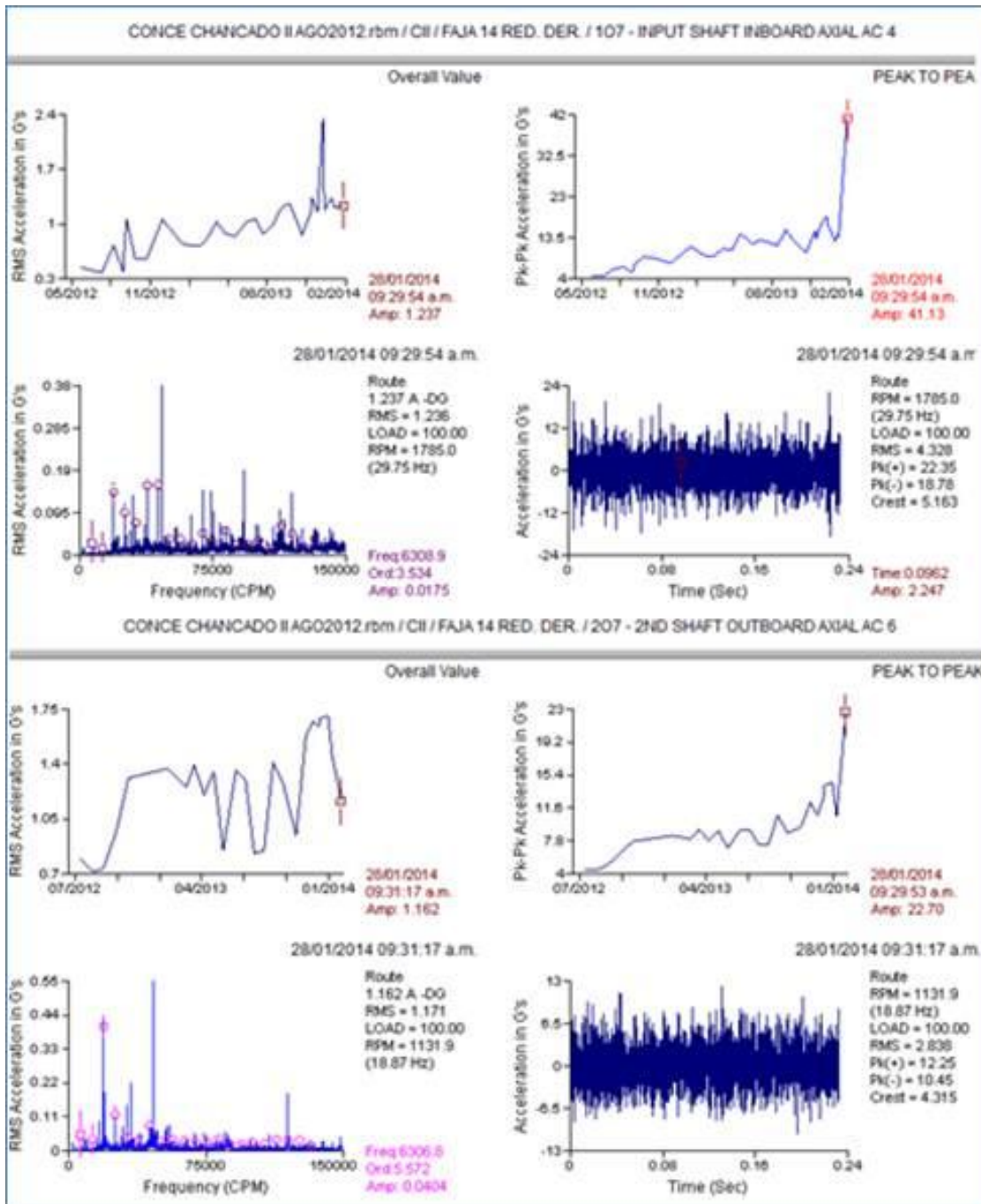


En reporte del 1ro de Enero del 2014, se nota una tendencia creciente de Peak view en las dos primeras reducciones, se empieza a notar una presencia de ruido.

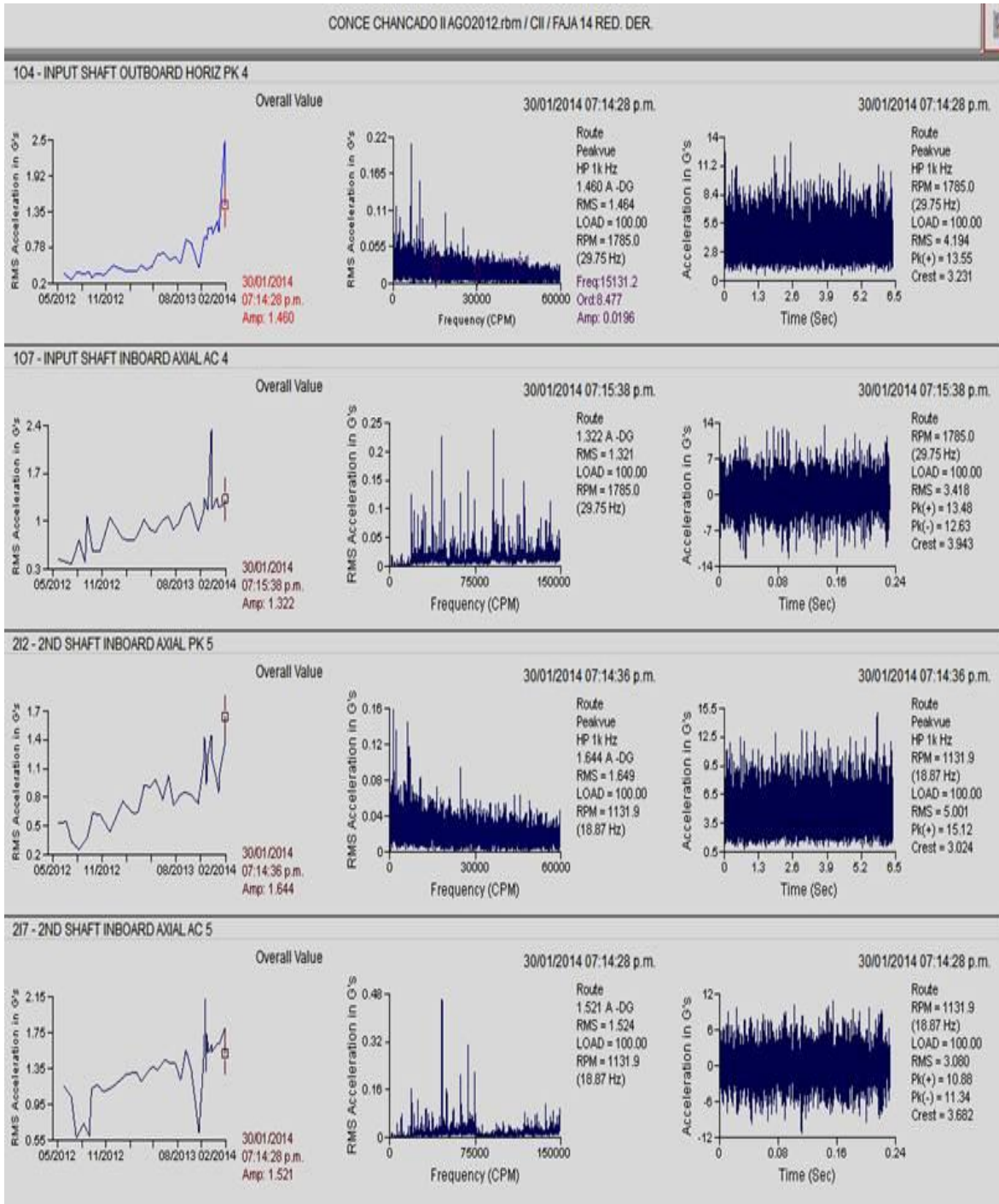


En el reporte del 28 de Enero del 2014, se nota un incremento significativo de la tendencia de Peak view en todas las reducciones con picos de hasta 2.5 Gs, con presencia de ruido en los espectros.





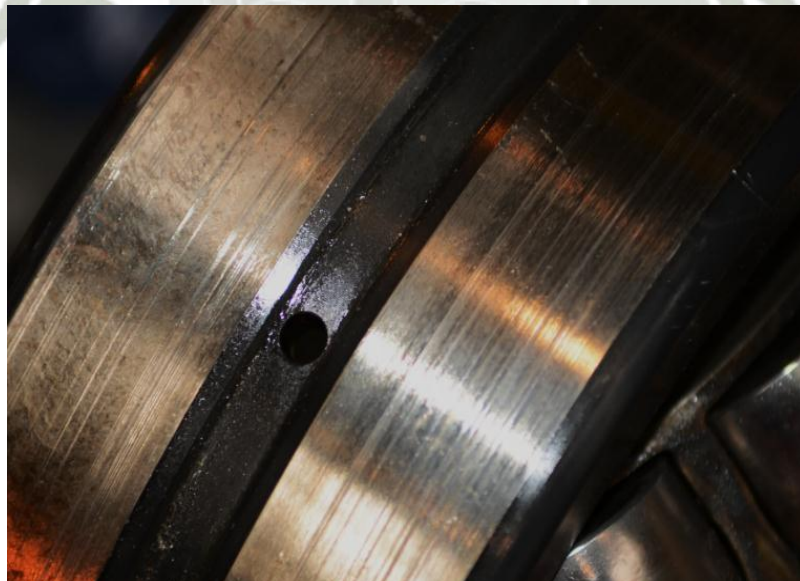
En el reporte del 30 de Enero del 2014, se mantiene la condición crítica con presencia continua de ruido.



En los resultados de las muestras de análisis de aceites no se encontró ningún valor anormal en desgastes.

| Descripcion Equipo | Descripcion Componente | Fecha Muestra | Visc40 C. cSt | Cod.ISO | Fe. ppm | Cr. ppm | Pb. ppm | Cu. ppm | Sn. ppm | Si. ppm | DF. ppm |
|--------------------|----------------------------|---------------|------------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 29-Jul-13 | 209.9 | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 13-Aug-13 | 206.1 | | 3 | 0.0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 28-Aug-13 | 209.1 | | 3 | 0.0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 10 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 10-Sep-13 | 200.2 | | 3 | 0.0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 11 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 24-Sep-13 | 214.0 | | 3 | 0.0 | 0 | 1 | 1 | 19 | 10 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 8-Oct-13 | 211.5 | | 3 | 0.0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 9 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 22-Oct-13 | 209.5 | | 5 | 0.0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 14 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 5-Nov-13 | 209.4 | | 5 | 0.0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 16 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 3-Dec-13 | 212.9 | | 4 | 0.0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 10 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 17-Dec-13 | 212.7 | 23/21/14 | 5 | 0.0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 10 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 31-Dec-13 | 214.3 | 23/21/14 | 6 | 0.0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 18 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 14-Jan-14 | 206.9 | 23/21/15 | 6 | 0.0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 19 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 28-Jan-14 | 213.2 | 23/22/16 | 8 | 0.0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 31 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 29-Jan-14 | 208.4 | 23/22/15 | 6 | 0.0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 29 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 25-Feb-14 | 212.7 | 23/21/13 | 5 | 0.3 | 0 | 1 | 0 | 3 | 15 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 11-Mar-14 | 212.1 | 23/20/12 | 3 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 5 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 25-Mar-14 | 212.0 | 23/20/13 | 2 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 8 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 8-Apr-14 | 206.9 | 23/20/12 | 2 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 22-Apr-14 | 208.2 | 23/20/12 | 3 | 0.0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 10 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 20-May-14 | 206.5 | 21/18/14 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| FAJA 014 | REDUCTOR DELANTERO DERECHO | 3-Jun-14 | 205.0 | 21/17/13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |

Estudio Reductor Derecho Faja CV014







ANEXO VIII – ANALISIS RODAMIENTOS BOMBA

ANEXO VIII – ANALISIS RODAMIENTOS BOMBA

| | |
|----------------------------|--|
| Datos del equipo: | Bomba |
| Componente: | Lado acople Bomba |
| Antecedentes: | <p>El equipo tiene una frecuencia de inspección de 20 días; con fecha 17 de diciembre se indica que existía un ruido inusual en el rodamiento lado acoplado de la bomba booster 2.</p> <p>El día 18 de diciembre se emite el reporte indicando que existe la presencia de golpes los cuales tienen una frecuencia equivalente a las RPM de la maquina; se recomendó realizar una inspección de los rodamientos.</p> |
| Evaluación del componente: | <p>En el análisis de los elementos recuperados observamos lo siguiente:</p> <p>Rodamientos pareados de diferente fabricante skf 16 elementos rodantes, fag 15 elementos rodantes.</p> <p>Rodamiento 1 FAG</p> <p>Marcas de trabajo: Desgaste normal de rodamiento.</p> <p>Falla del elemento: La pista interior y exterior presento corrosión por contacto y marcas de deslizamiento circular.</p> <p>Rodamiento 2 SKF</p> <p>Marcas de trabajo: Desgaste normal de rodamiento.</p> <p>Falla del elemento: La pista exterior presenta corrosión por contacto y marcas de deslizamiento circular.</p> |

Posibles causas:

Soltura mecánica de rodamientos, deslizamiento circular; debido a la interferencia insuficiente o juego inadecuado entre el alojamiento y el rodamiento.

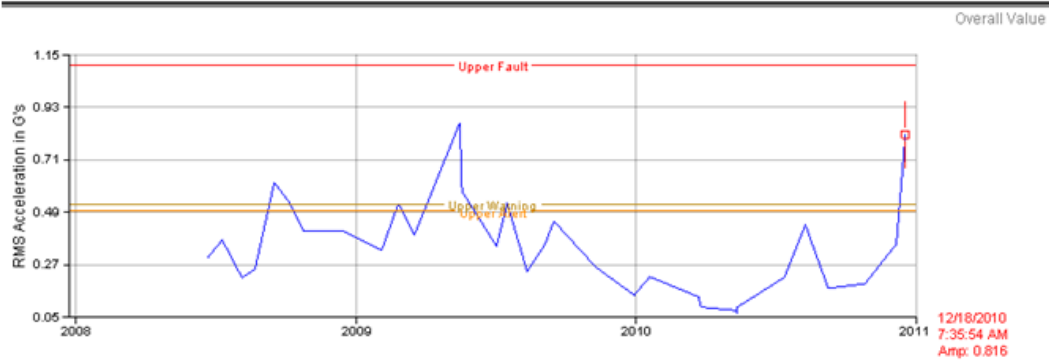
Estudio Análisis Vibracional Rodamiento Bomba Elevadora de Agua

PP831 Se observa tendencia creciente de peakvue del punto 2 lado acoplador del motor, lubricar motor

PP832 En onda en el tiempo se observa golpes a la velocidad de giro, de baja amplitud. Inspeccionar rodamiento.

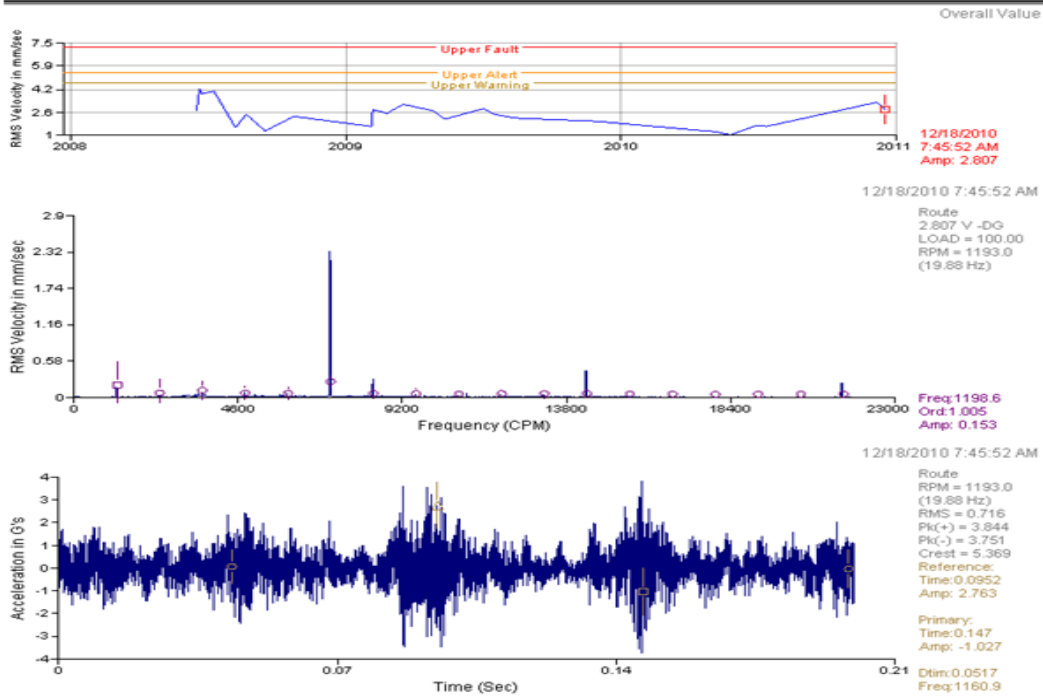
PP831: 2A

CONCE AGUAS Y RELAVES.rbm / 3800 / BOOS TER 2 BOMBA 1 / M2P - Motor Inboard Horz Peakvue



PP832: 4H

CONCE AGUAS Y RELAVES.rbm / 3800 / BOOS TER 2 BOMBA 2 / P4H - Pump Outboard Horizontal



Estudio Rodamientos de bomba lado fijo

FAG 7220G

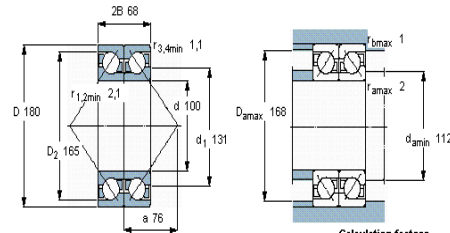
SKF 7220 BECBM

Angular contact ball bearings, single row, for paired mounting, back-to-back arrangement

Product information

Tolerances, see also text
Axial internal clearance, a), b), preload, see also text
Recommended fits
Shaft and housing tolerances

| Principal dimensions | | Basic load ratings dynamic | | static | Fatigue load limit | Speed ratings Reference | Limiting speed | Mass | Designation | Bearing arrangement |
|----------------------|-----|----------------------------|-----|----------------|--------------------|-------------------------|----------------|------|----------------|---------------------|
| d | D | 2B | C | C ₀ | P _u | r/min | | kg | - | - |
| mm | | | kN | | kN | | | | | |
| 100 | 180 | 68 | 221 | 245 | 8,8 | 3200 | 4300 | 7,20 | 2 × 7220 BECBM | DB |



Calculation factors
k_r 0,085
e 1,14
X 0,57
Y₁ 0,55
Y₂ 0,93
Y₀ 0,52

medias® Home ⇒ Rolling and plain bearings, accessories ⇒ 72..B ⇒ 7220-B-TVP

Series selection Product selection **Product data** Description Calculation CAD Shopping basket Datasheet

Angular contact ball bearings 7220-B-TVP

main dimensions to DIN 628-1, contact angle $\alpha = 40^\circ$

| | | |
|---------------------------|------------|-----------------------------------|
| d | 100 mm | |
| D | 180 mm | |
| B | 34 mm | |
| a | 76 mm | |
| D₁ | 149,6 mm | |
| D_{a max} | 168 mm | |
| D_{d max} | 173 mm | |
| d₁ | 132,3 mm | |
| d_{a min} | 112 mm | |
| r_{1 min} | 1,1 mm | |
| f_{a max} | 2,1 mm | |
| f_{a1 max} | 1 mm | |
| r_{min} | 2,1 mm | |
| m | 3,17 kg | Mass |
| C_r | 142000 N | Basic dynamic load rating, radial |
| e | 1,14 | |
| X | 0,35 | |
| Y | 0,57 | |
| Y₀ | 0,26 | |
| C_{0r} | 124000 N | Basic static load rating, radial |
| n_G | 3800 1/min | Limiting speed |
| n_B | 4250 1/min | Reference speed |
| C_{ur} | 7100 N | Fatigue limit load, radial |

Evidencia De Falla





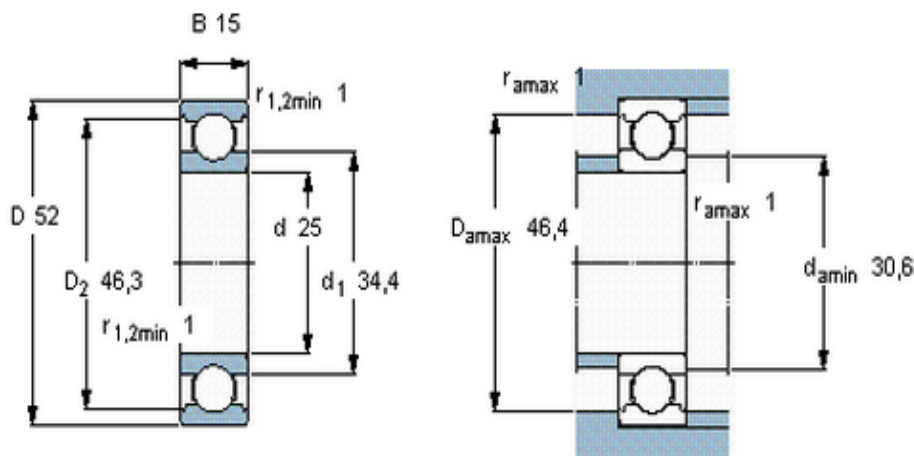


ANEXO X - TABLAS DE CARACTERÍSTICAS DE RODAMIENTOS



ANEXO X - TABLAS DE CARACTERISTICAS DE RODAMIENTOS

| Principal dimensions | | | Basic load ratings | | Fatigue load limit | Speed ratings | Limiting speed | M |
|----------------------|----|----|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|----------------|-----|
| d | D | B | dynamic C | static C_0 | | Reference speed | | |
| mm | | | kN | | kN | r/min | | kg |
| 25 | 52 | 15 | 14,8 | 7,8 | 0,335 | 28000 | 18000 | 0,7 |



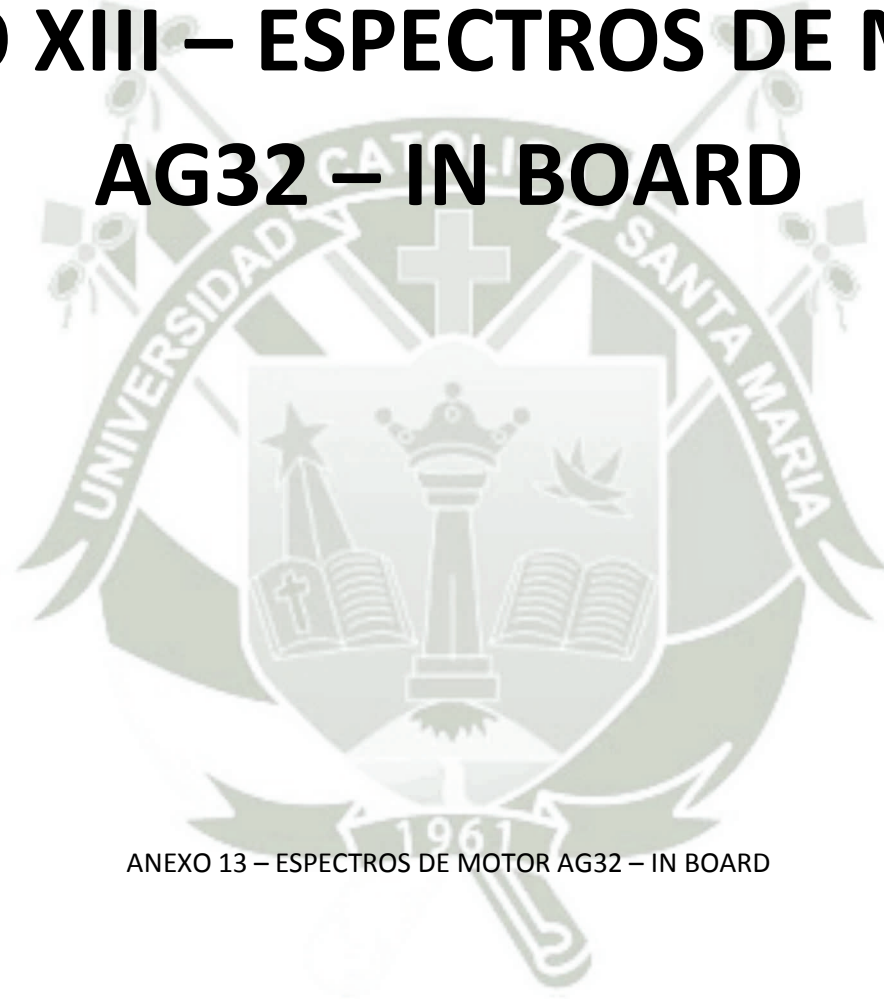
Calculation factors

$k_r = 0,025$
 $f_0 = 14$

ANEXO XII – TABLA DE NIVELES DE SEVERIDAD

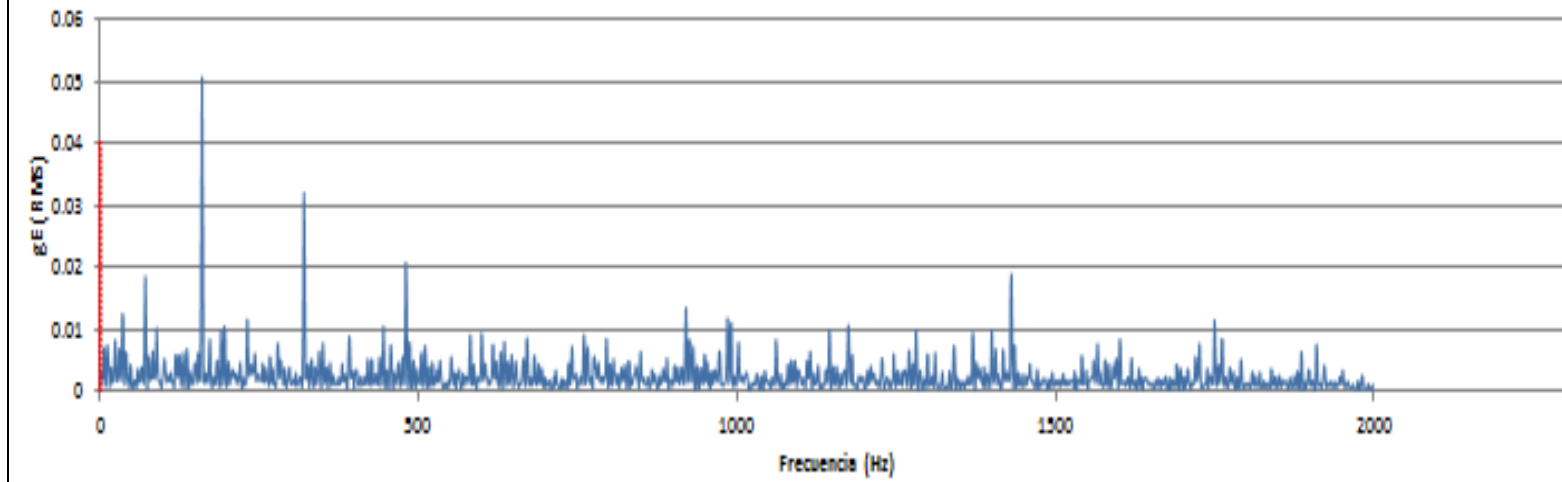
| Enveloping Severity | Shaft Diameter & Speed | | |
|------------------------|--|--|---|
| | Dia. between 200 & 500mm and Speed <500rpm | Dia. Between 50 & 300 mm & speed between 500 & 1800rpm | Dia. Between 20 & 150mm & Speed is either 1800 or 3600rpm |
| gE peak to peak | | | |
| 0.1 | Good | Good | Good |
| 0.5 | Satisfactory | | |
| 0.75 | | Satisfactory | |
| 1 | Unsatisfactory (alert) | Unsatisfactory (alert) | Satisfactory |
| 2 | Unacceptable (danger) | | Unacceptable (danger) |
| 4 | | Unacceptable (danger) | Unacceptable (danger) |
| 10 | | | Unacceptable (danger) |

ANEXO XIII – ESPECTROS DE MOTOR AG32 – IN BOARD

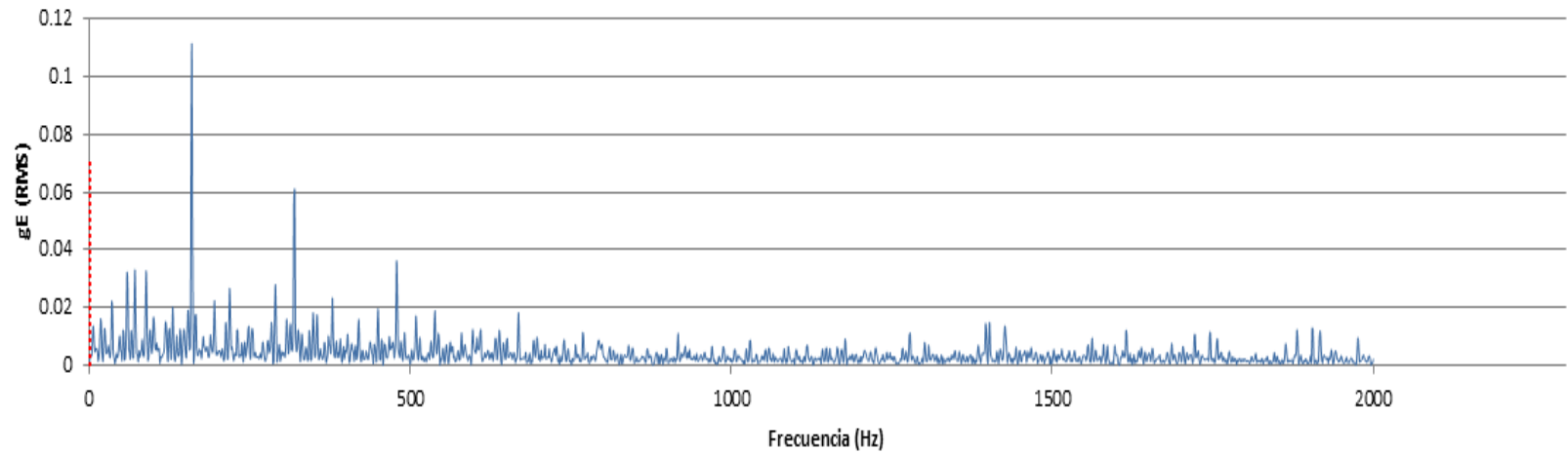


ANEXO 13 – ESPECTROS DE MOTOR AG32 – IN BOARD

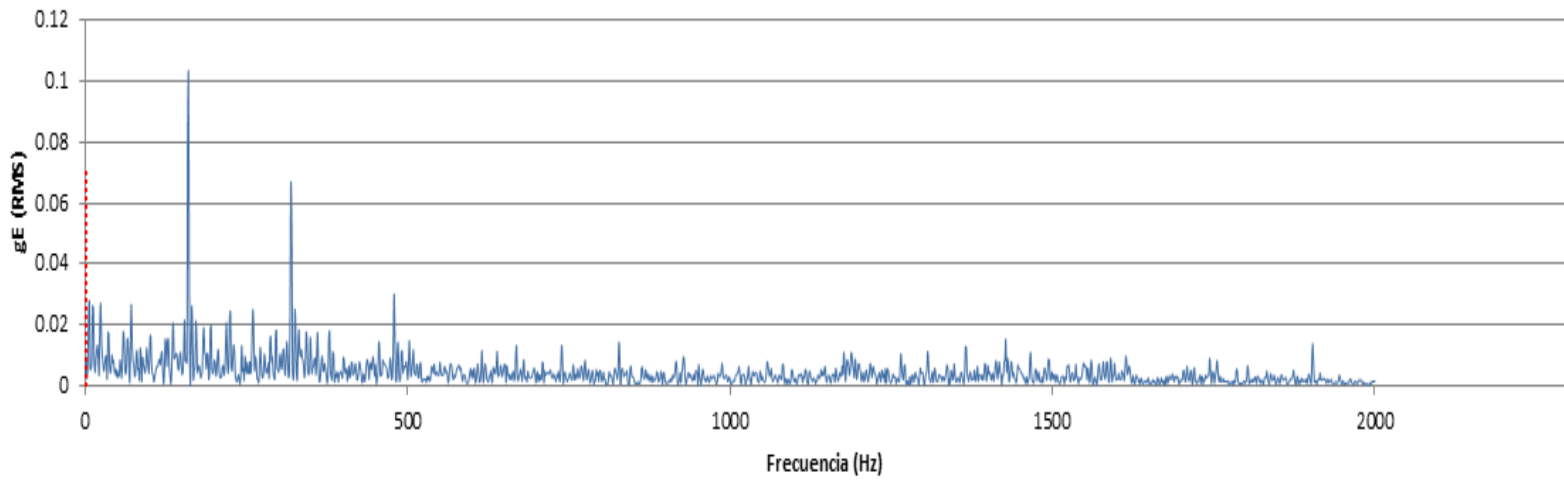
AG 32 IN BOARD - 12/09/2015



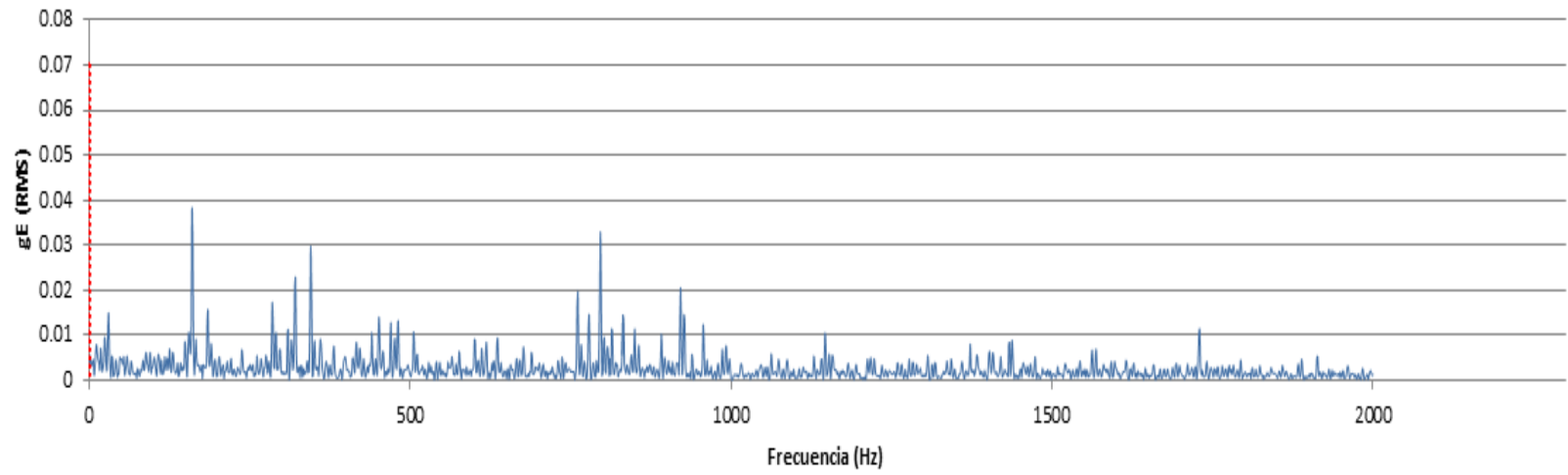
AG 32 IN BOARD - 18/09/2015



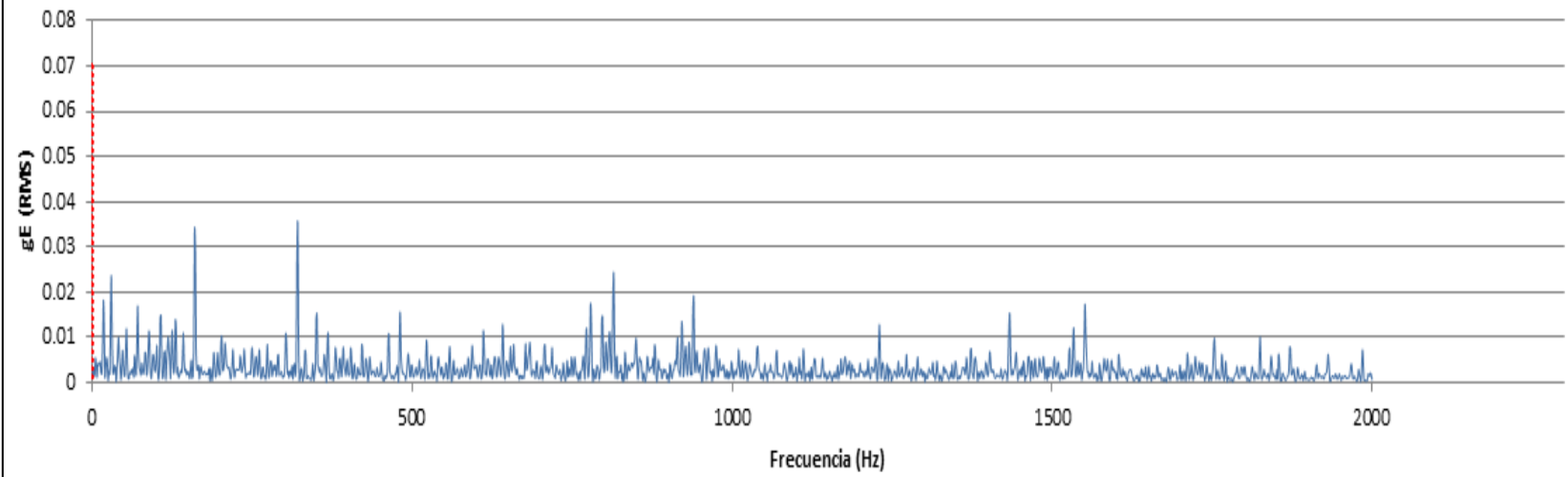
AG 32 IN BOARD - 22/09/2015



AG 32 IN BOARD - 24/09/2015



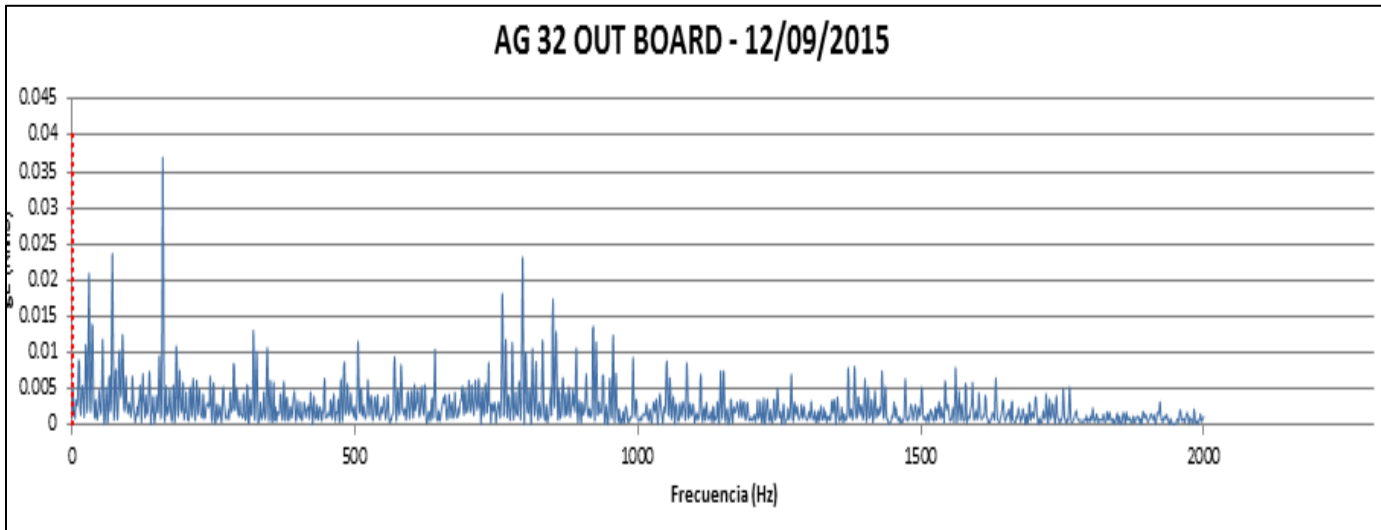
AG 32 IN BOARD - 28/09/2015



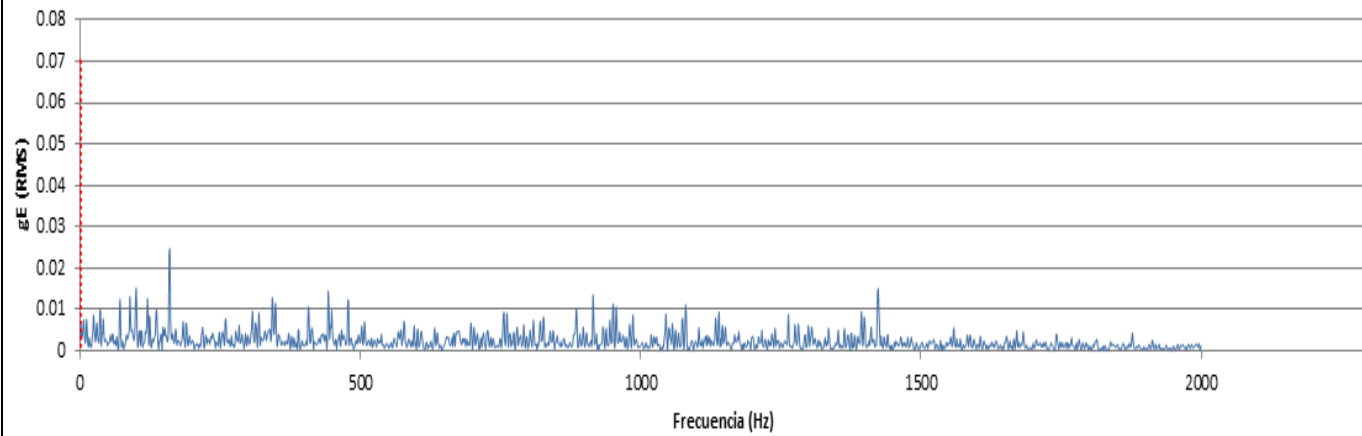
ANEXO XIV – ESPECTROS DE MOTOR AG32 OUT-BOARD



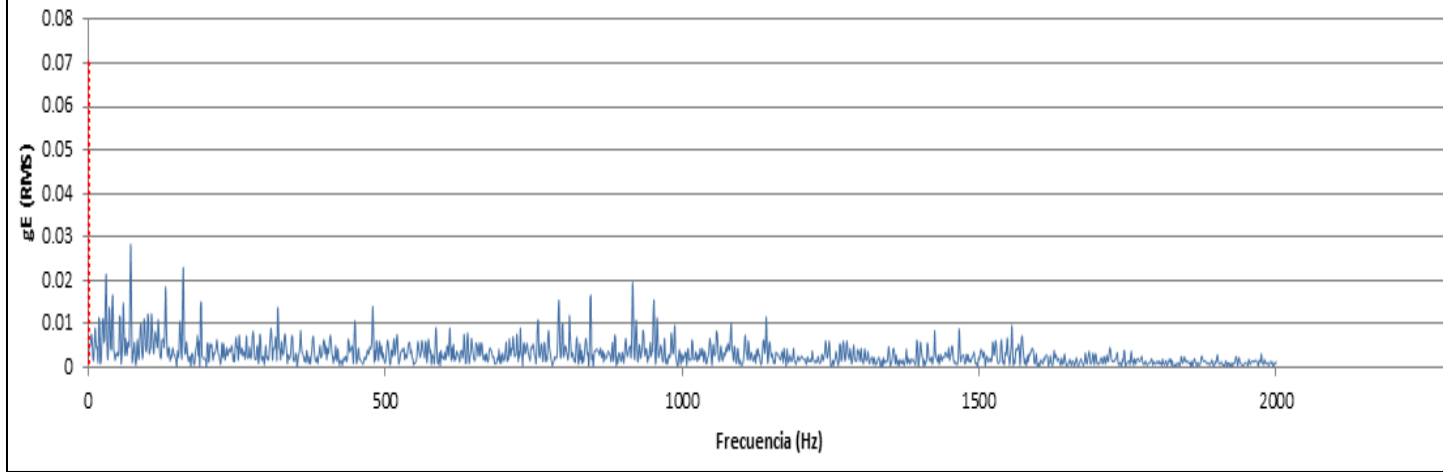
ANEXO 14 – ESPECTROS DE MOTOR AG32 OUT-BOARD



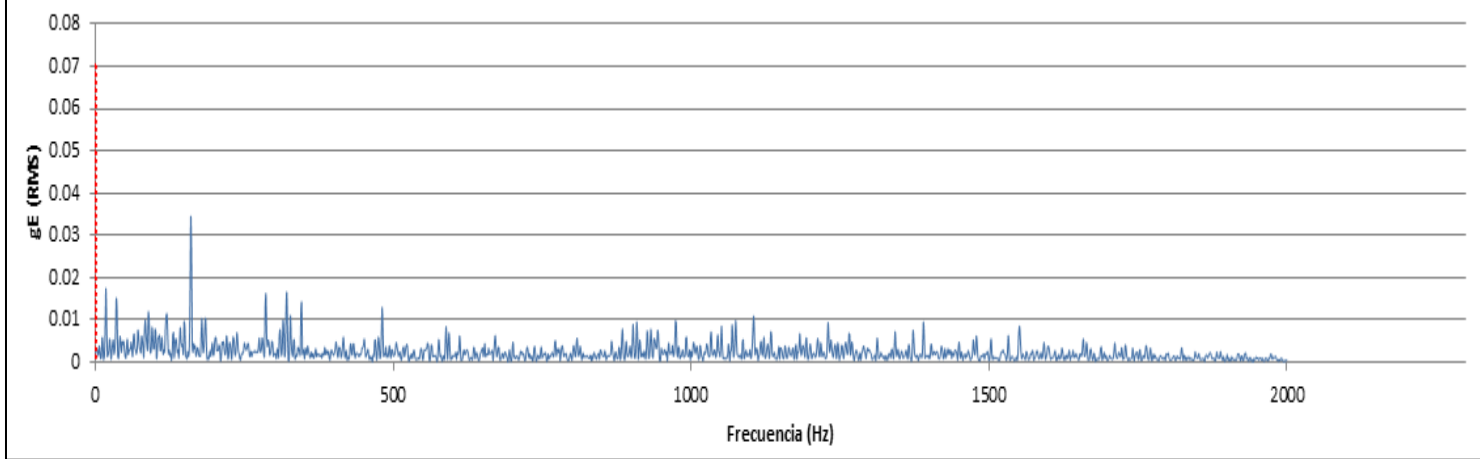
AG 32 OUT BOARD - 18/09/2015



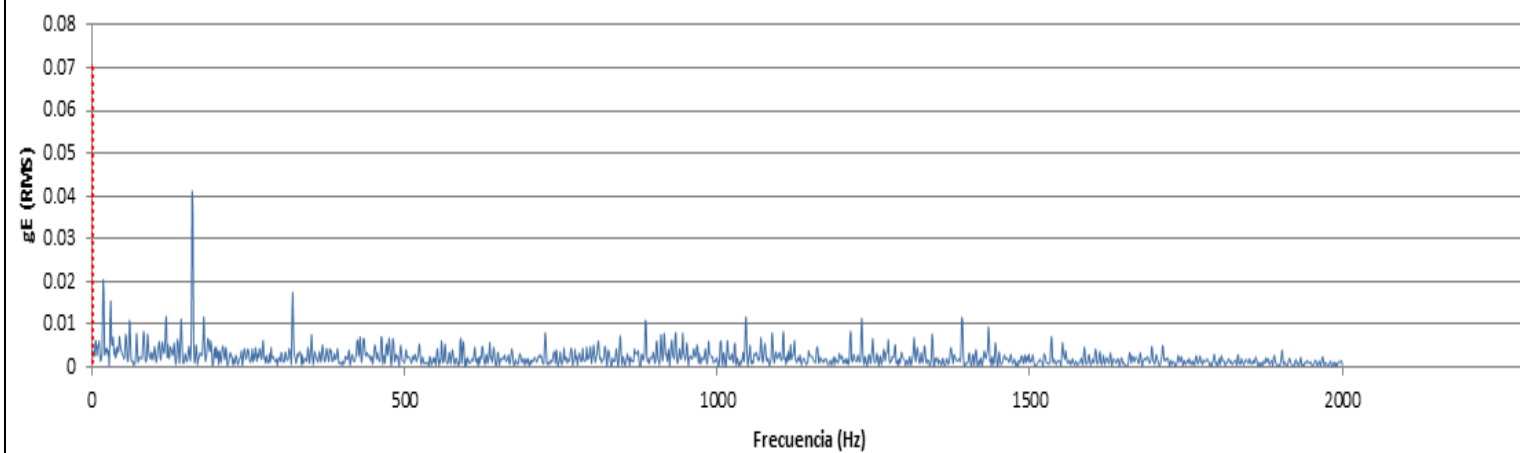
AG 32 OUT BOARD - 22/09/2015



AG 32 OUT BOARD - 24/09/2015



AG 32 OUT BOARD - 28/09/2015

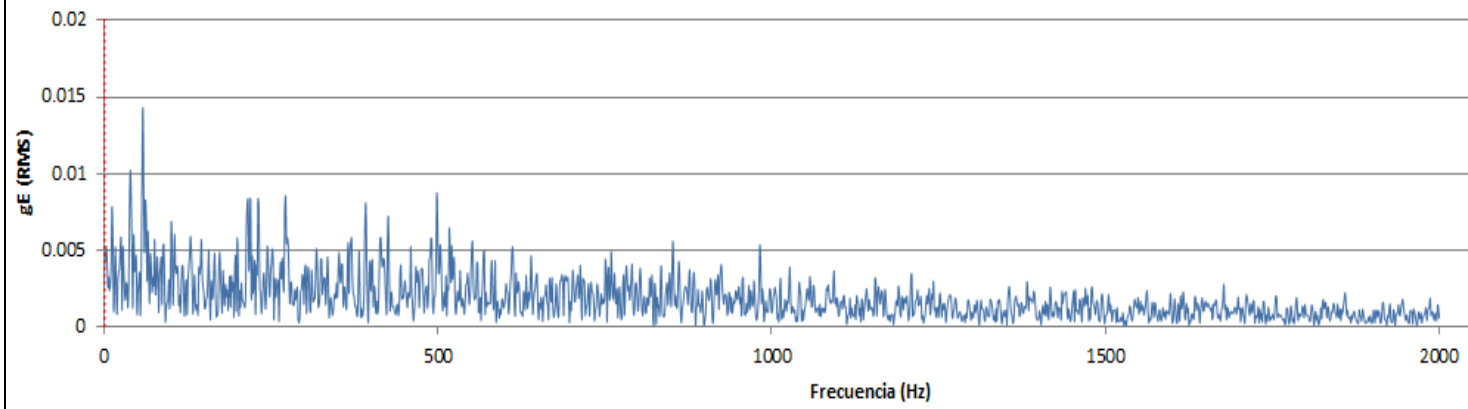


ANEXO XV – ESPECTRO DE MOTOR

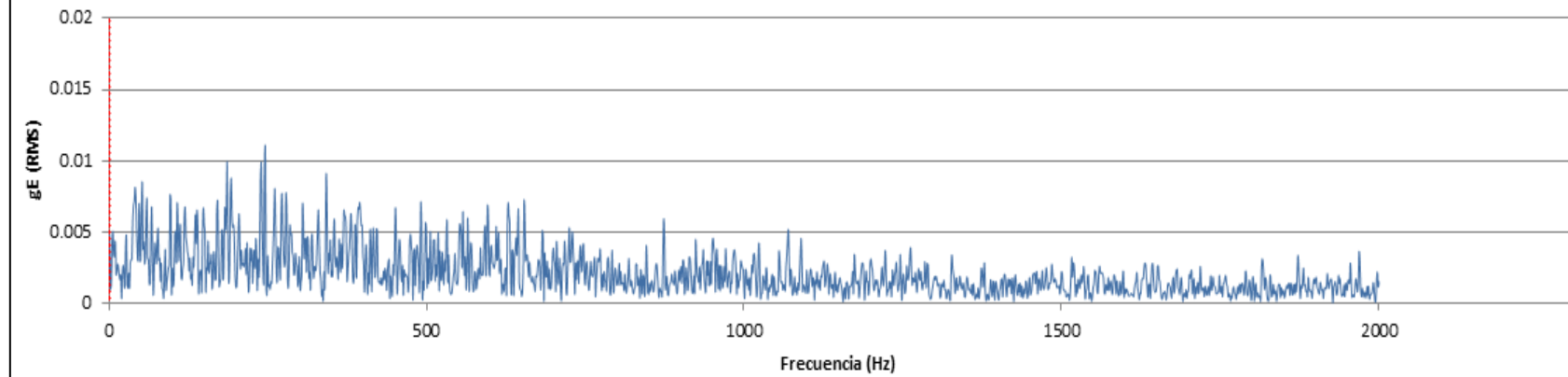


ANEXO 15 – ESPECTRO DE MOTOR

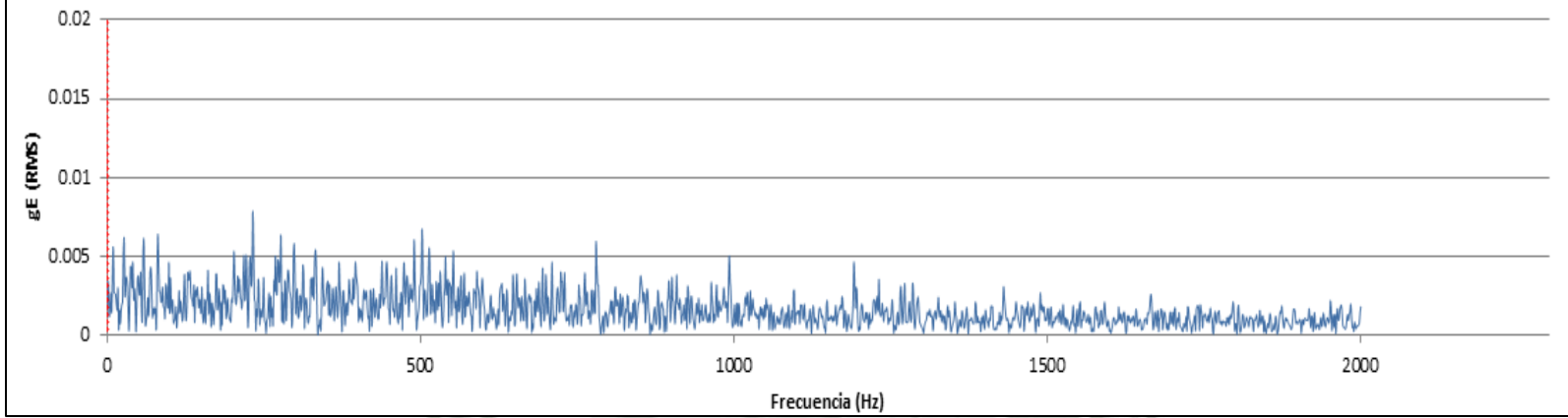
BRA IN BOARD - 12/09/2015



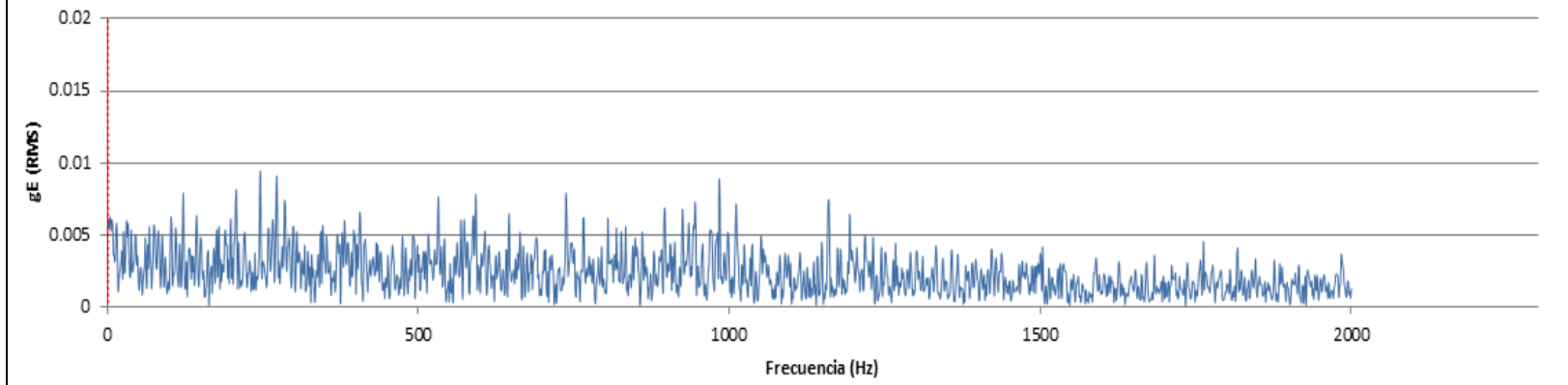
BRA IN BOARD - 13/09/2015



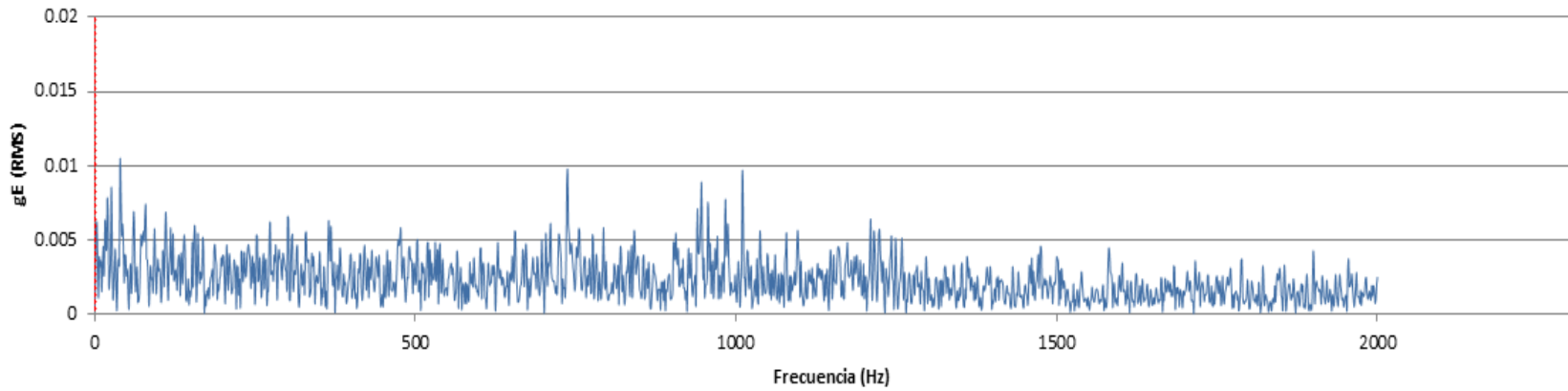
BRA IN BOARD - 14/09/2015



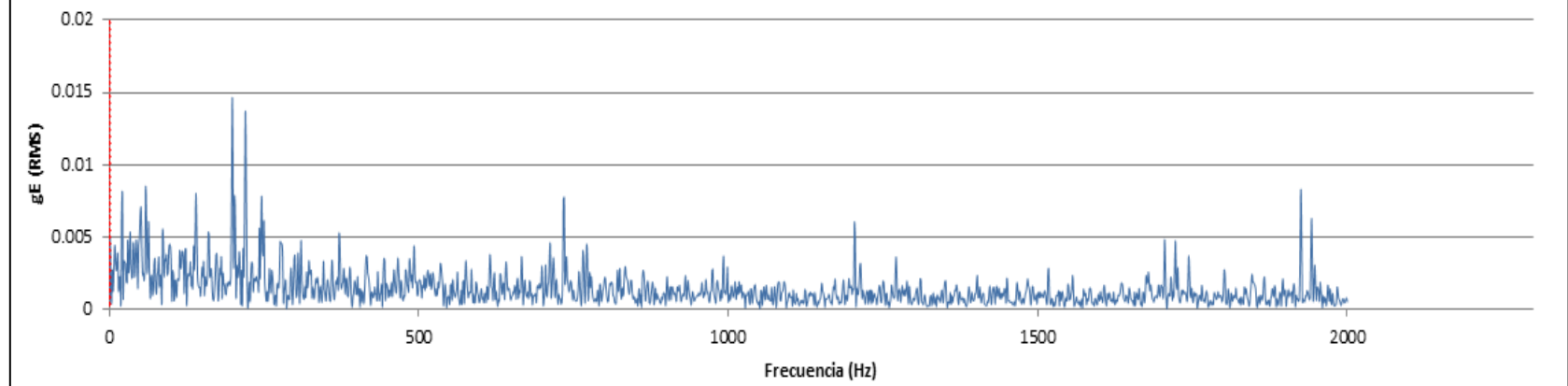
BRA IN BOARD 15/09/2015



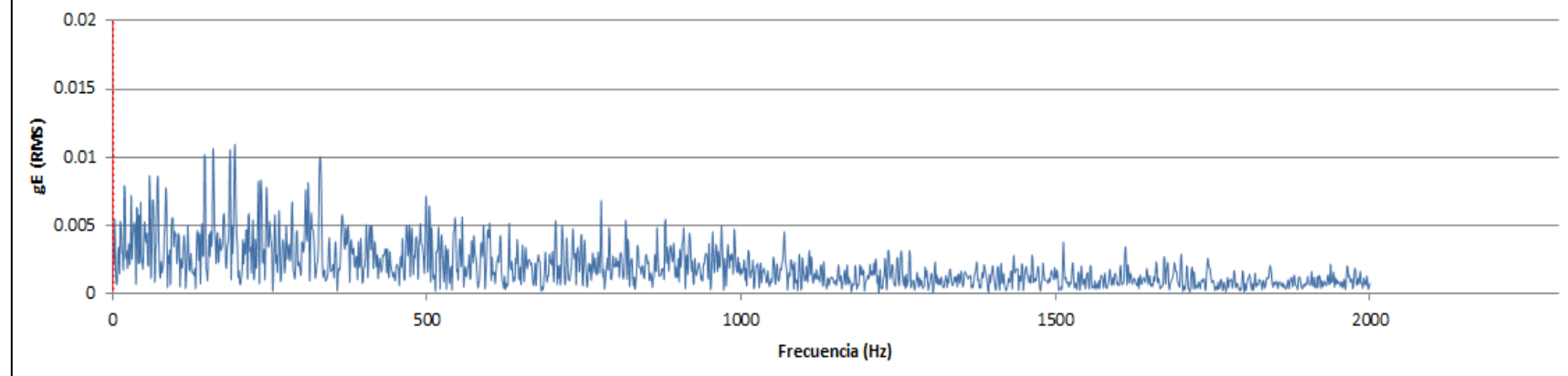
BRA IN BOARD - 16/09/2015



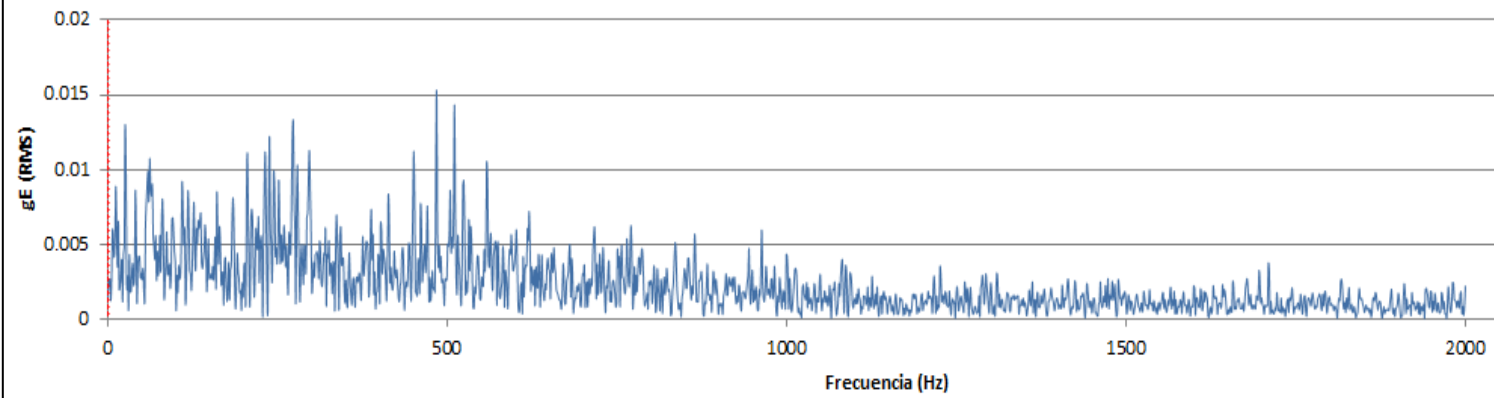
BRA IN BOARD - 17/09/2015



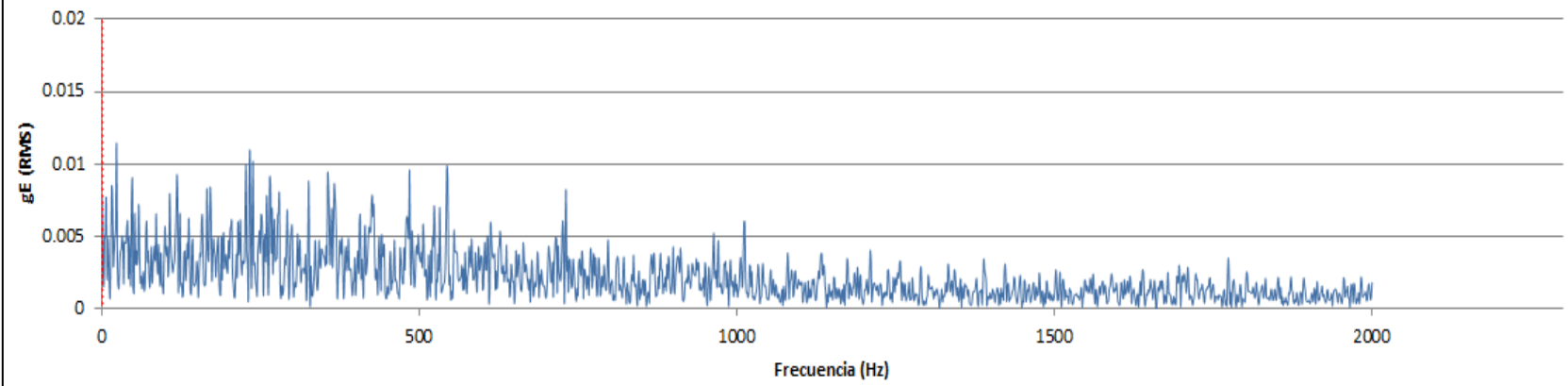
BRA IN BOARD - 18/09/2015



BRA IN BOARD - 19/09/2015



BRA IN BOARD - 21/09/2015

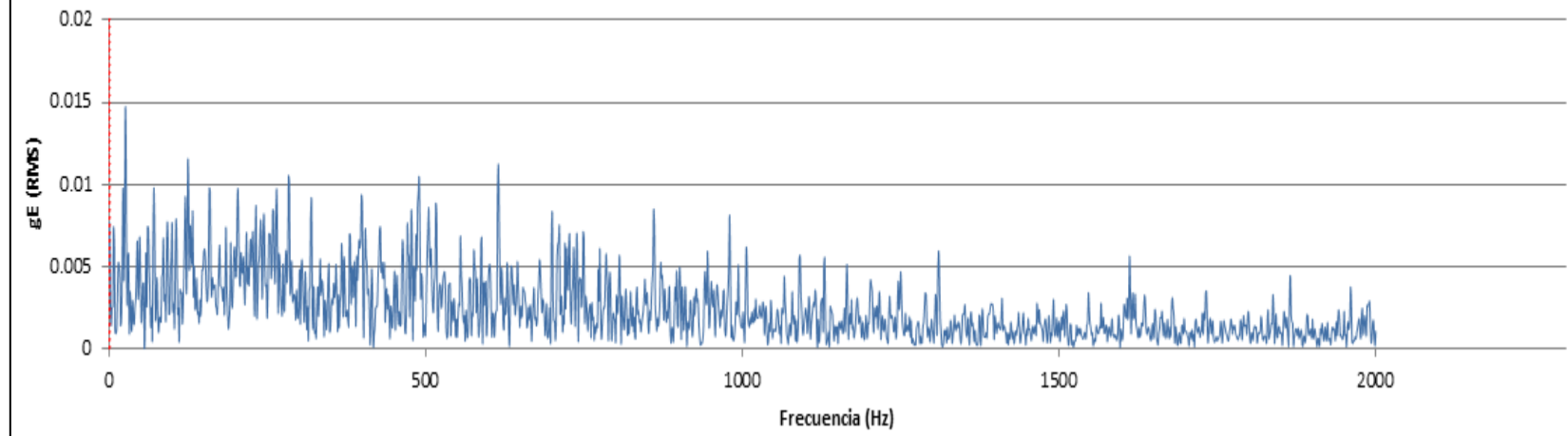


ANEXO XVI – ESPECTRO DE MOTOR OUT BOARD

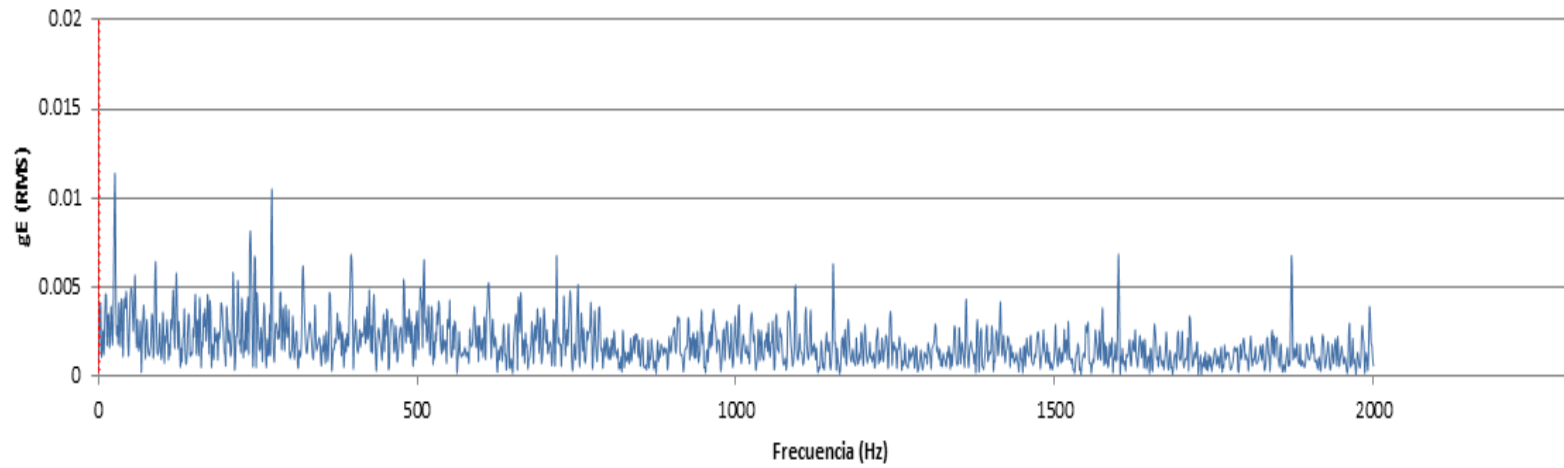


ANEXO 16 – ESPECTRO DE MOTOR OUT BOARD

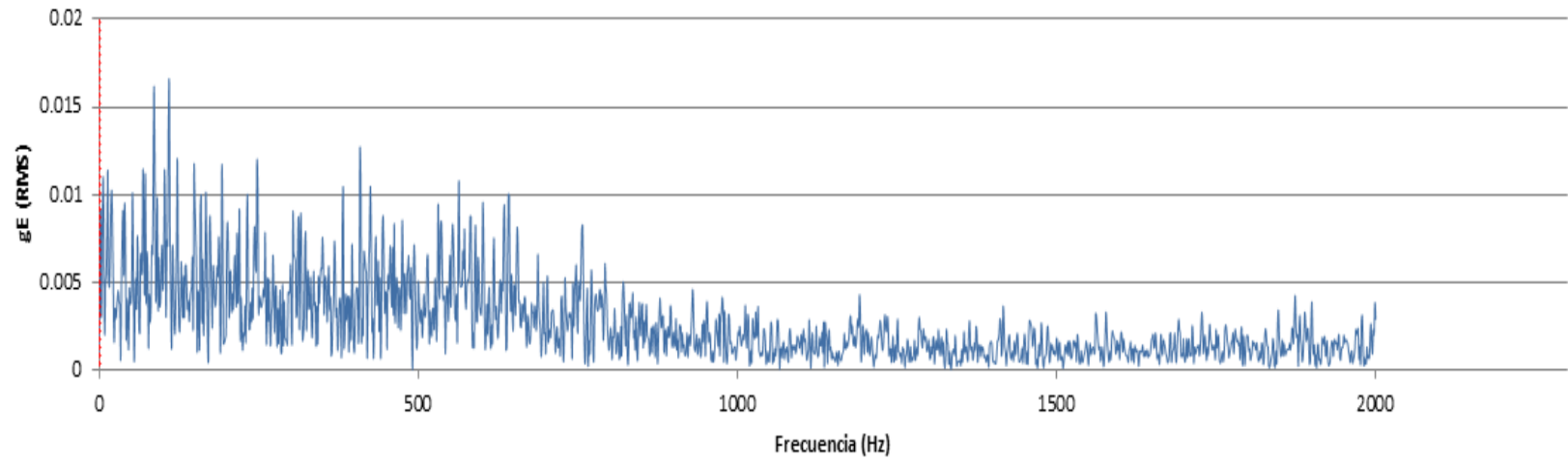
BRA OUT BOARD - 12/09/2015



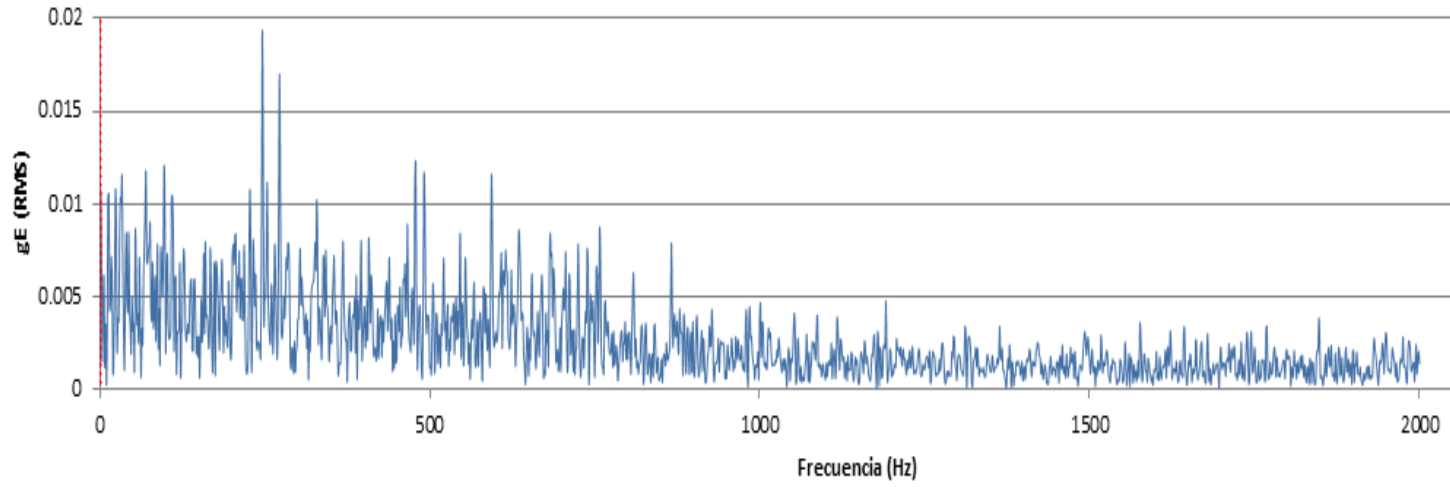
BRA OUT BOARD - 13/09/2015



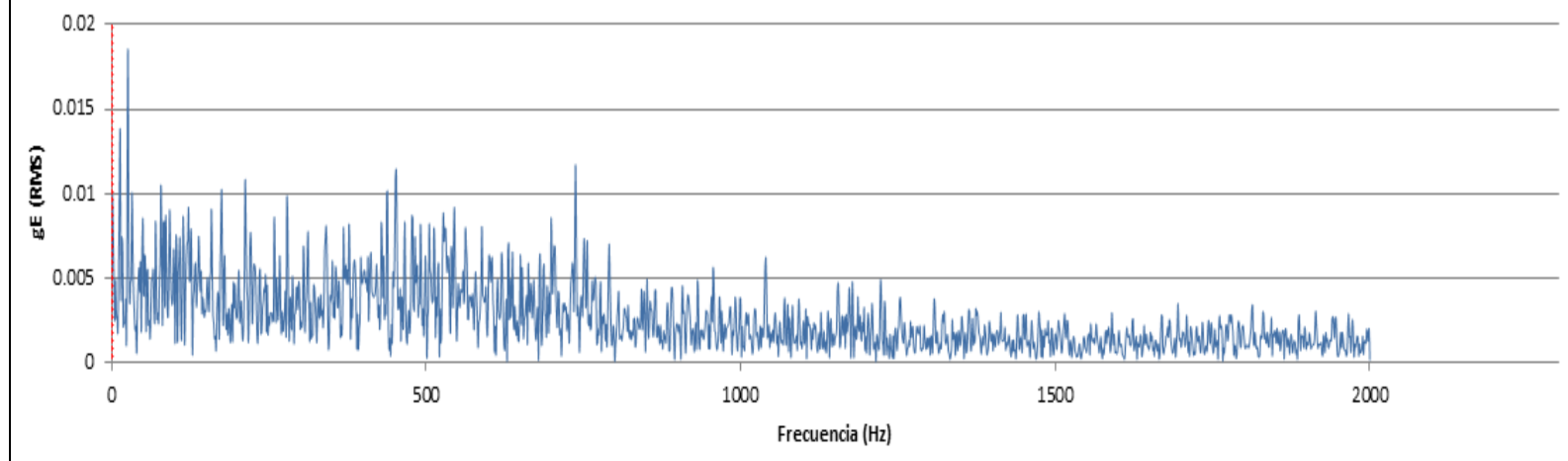
BRA OUT BOARD - 14/09/2015



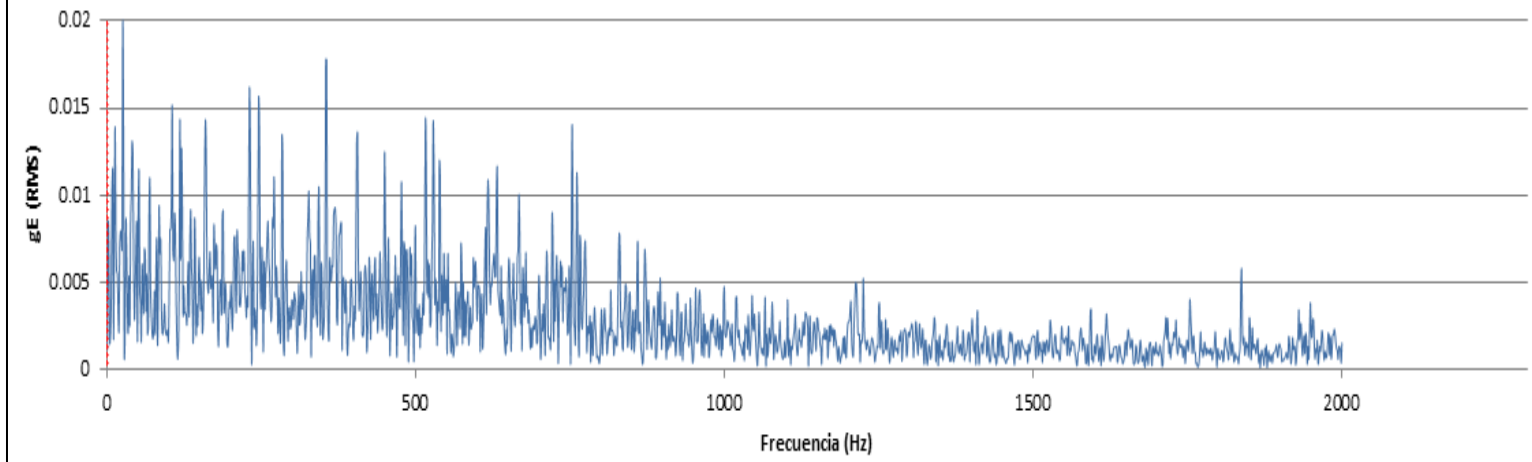
BRA OUT BOARD - 15/09/2015



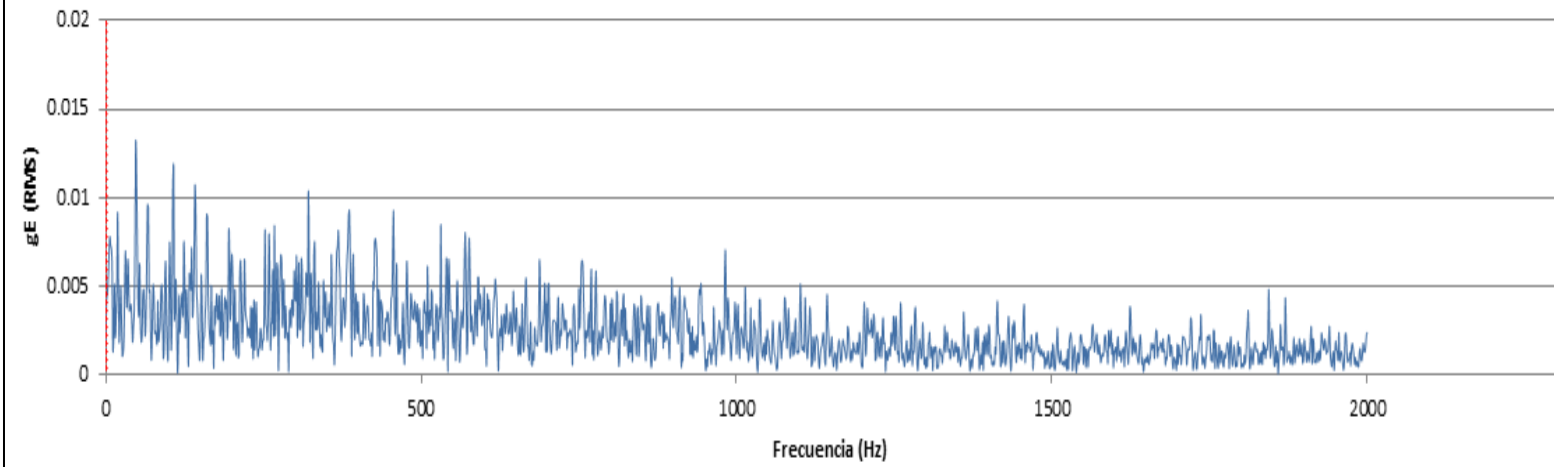
BRA OUT BOARD - 16/09/2015



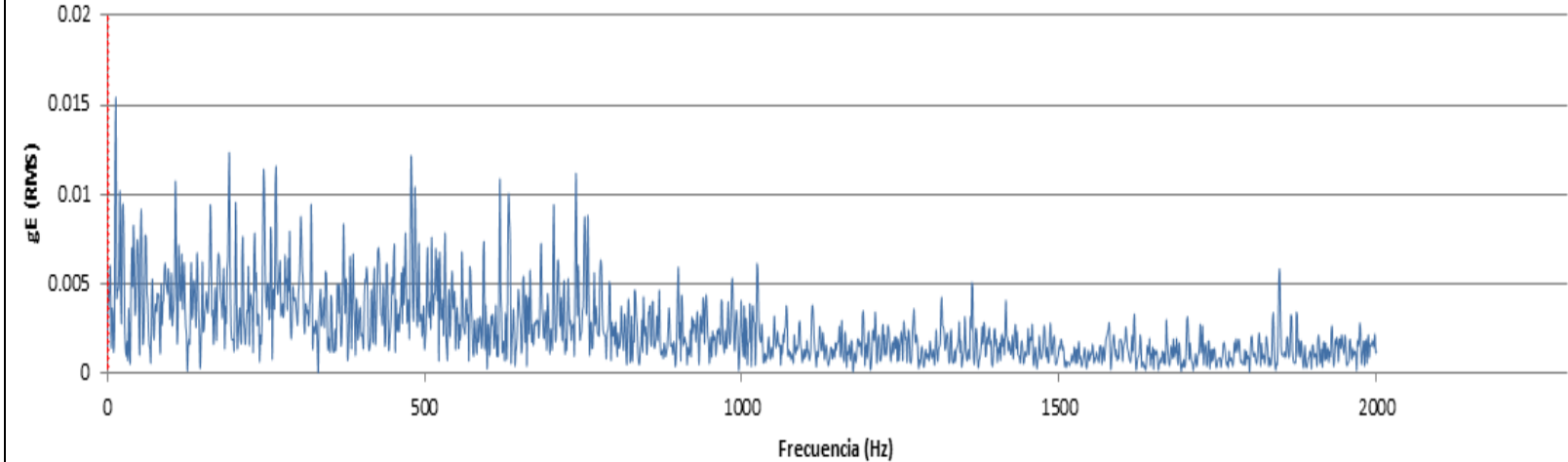
BRA OUT BOARD - 17/09/2015



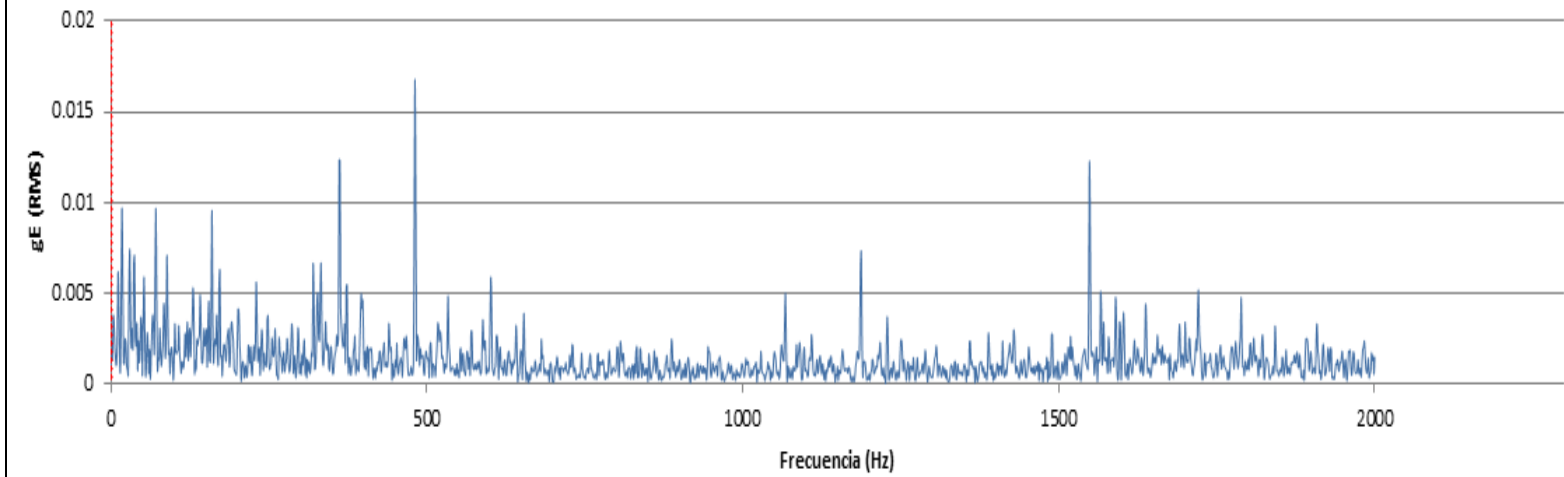
BRA OUT BOARD - 18/09/2015



BRA OUT BOARD - 19/09/2015



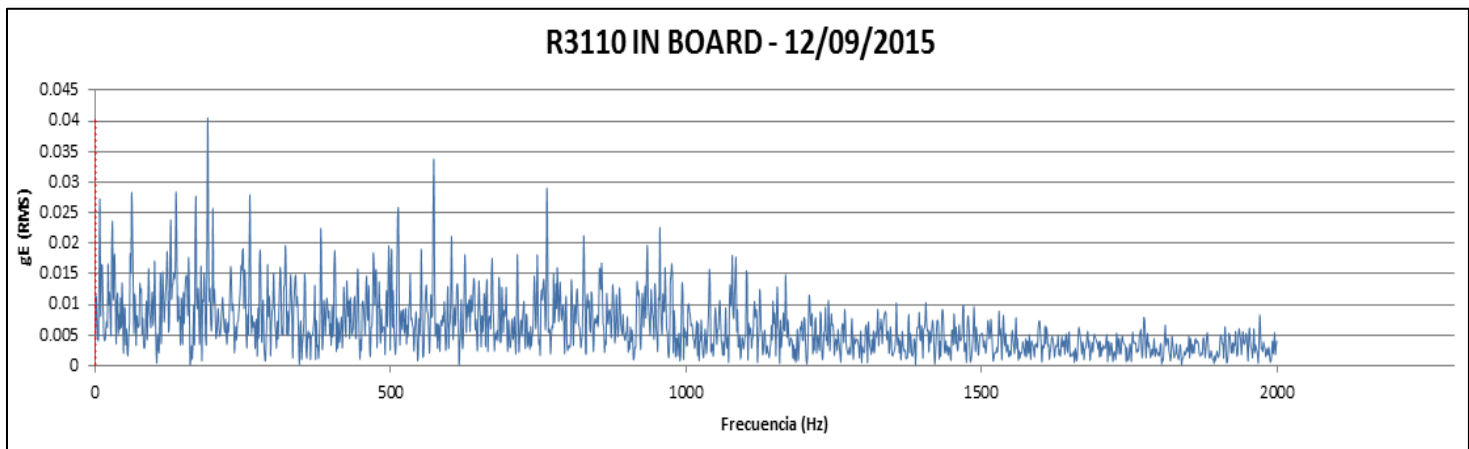
BRA OUT BOARD - 21/09/2015



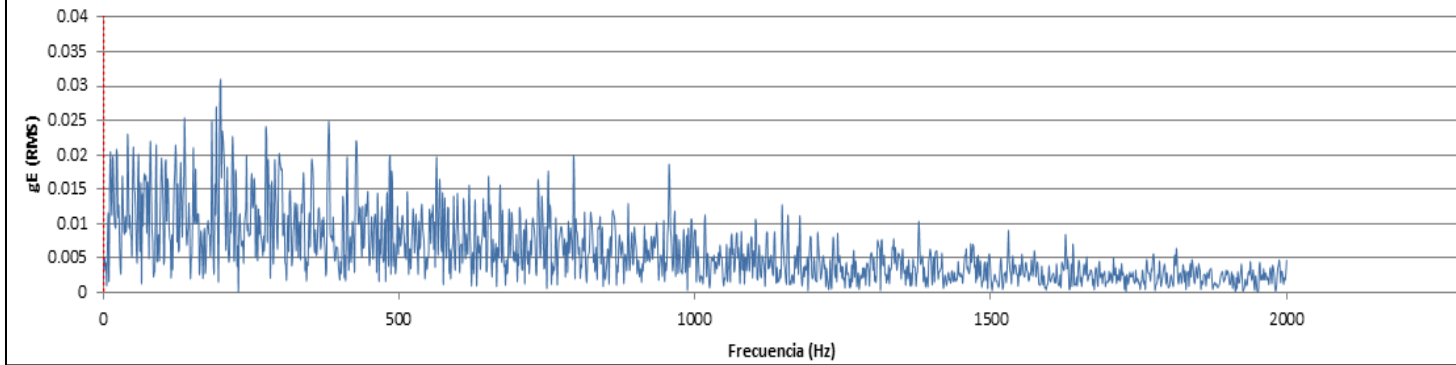


ANEXO XVII – ESPECTROS MOTOR R3110 IN BOARD

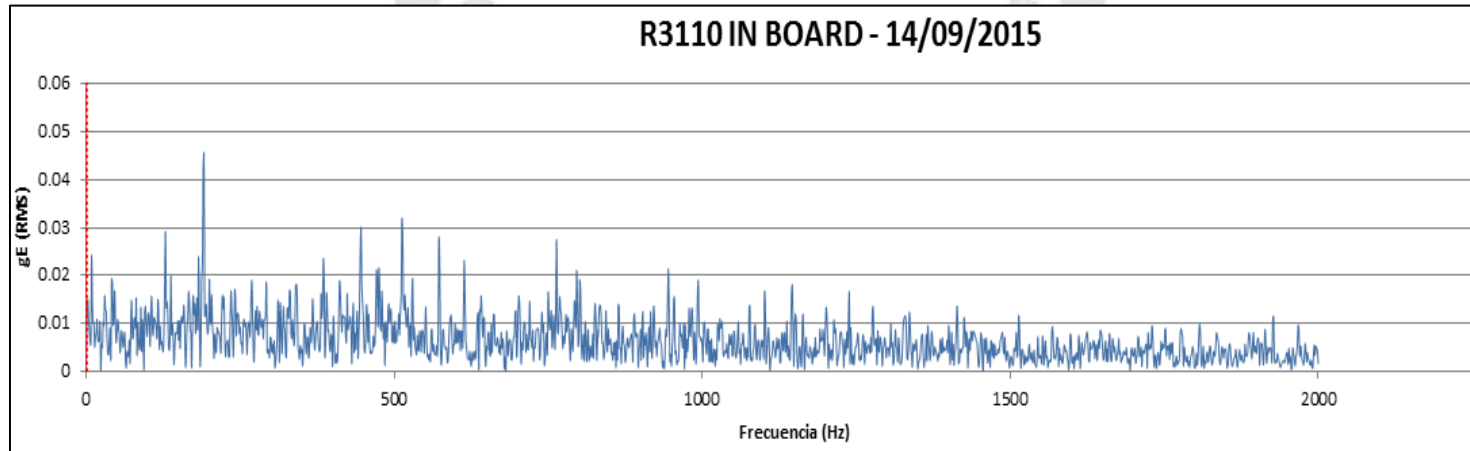
ANEXO 17 – ESPECTROS MOTOR R3110 IN BOARD



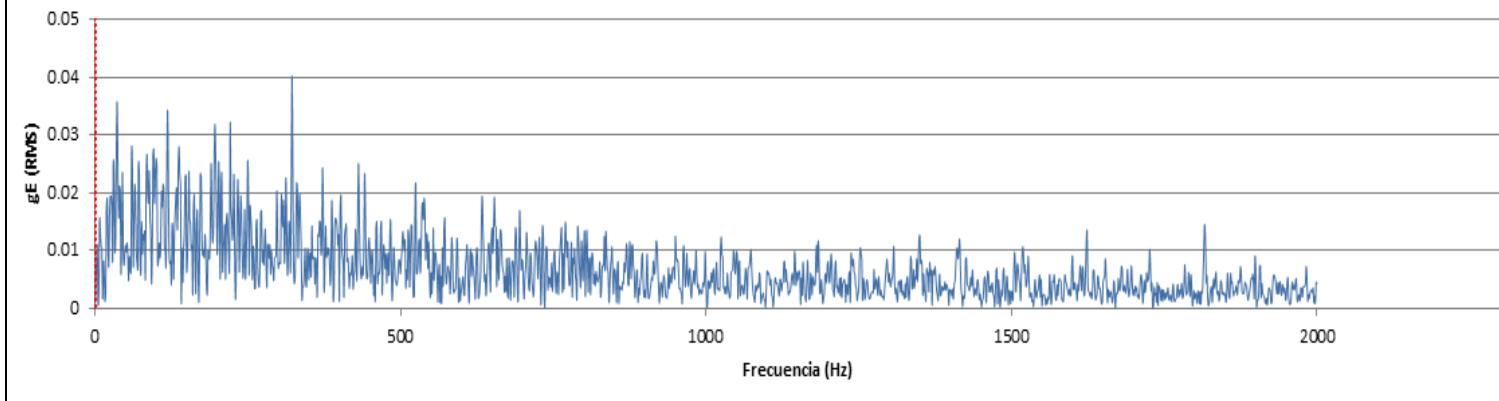
R3110 IN BOARD - 13/09/2015



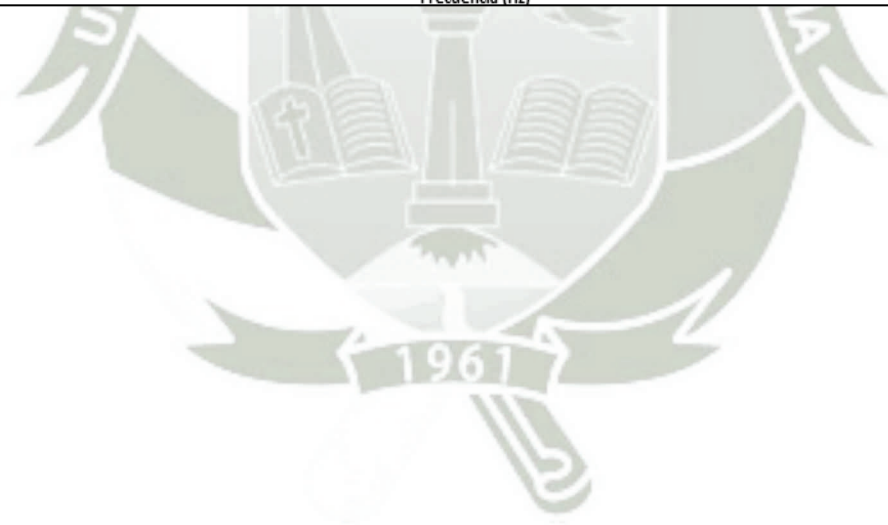
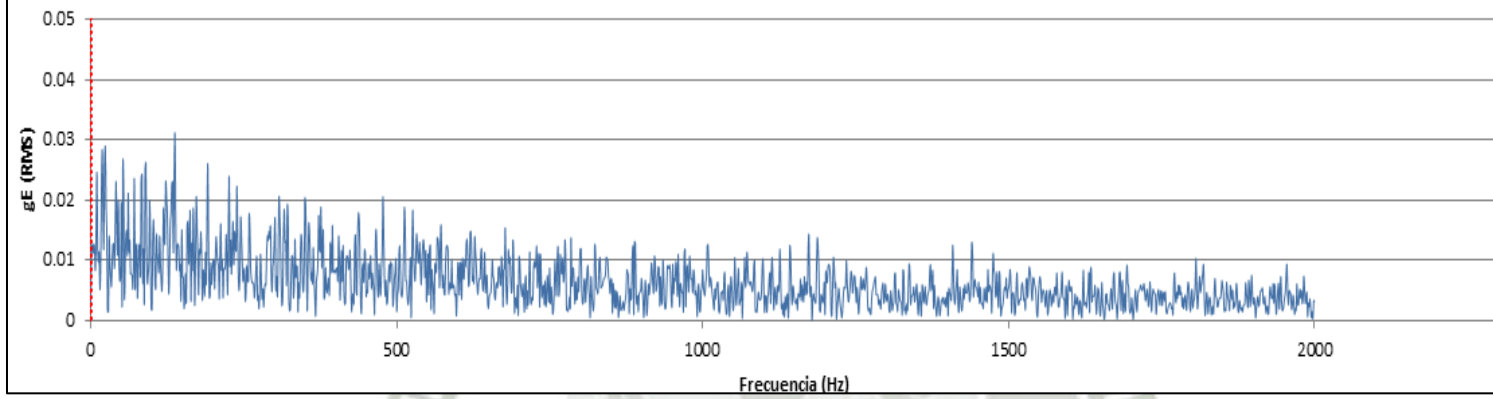
R3110 IN BOARD - 14/09/2015



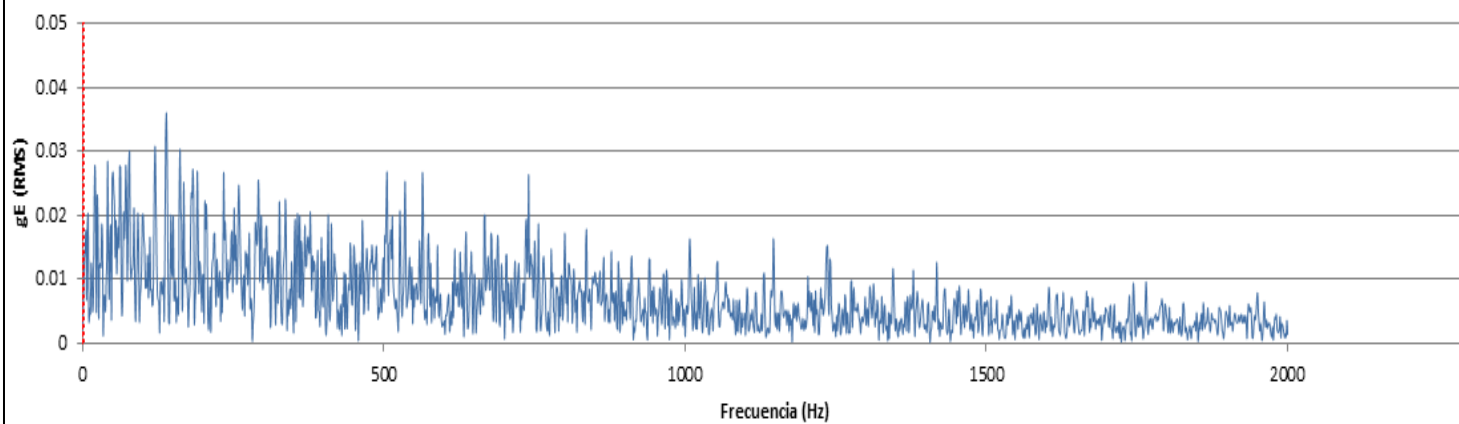
R3110 IN BOARD - 15/09/2015



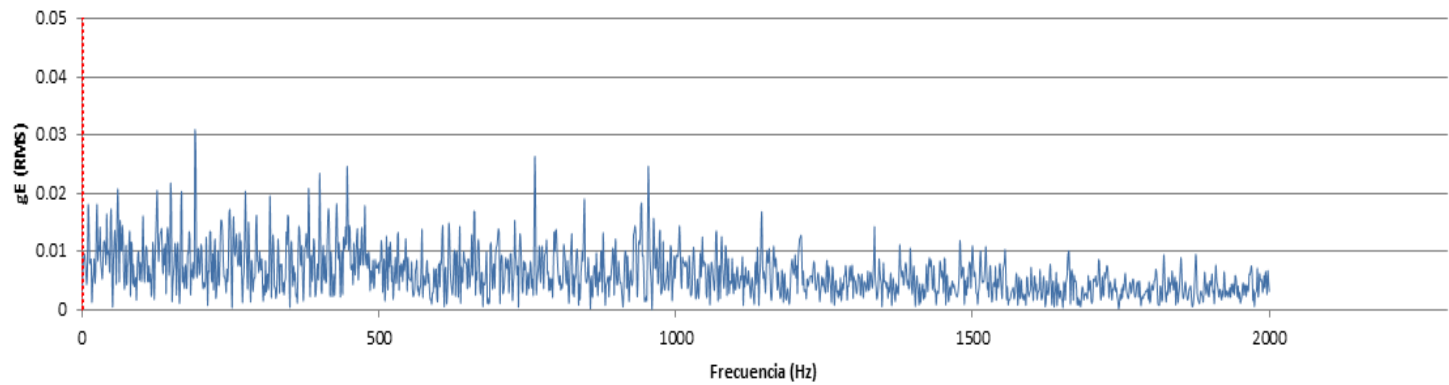
R3110 IN BOARD - 16/09/2015

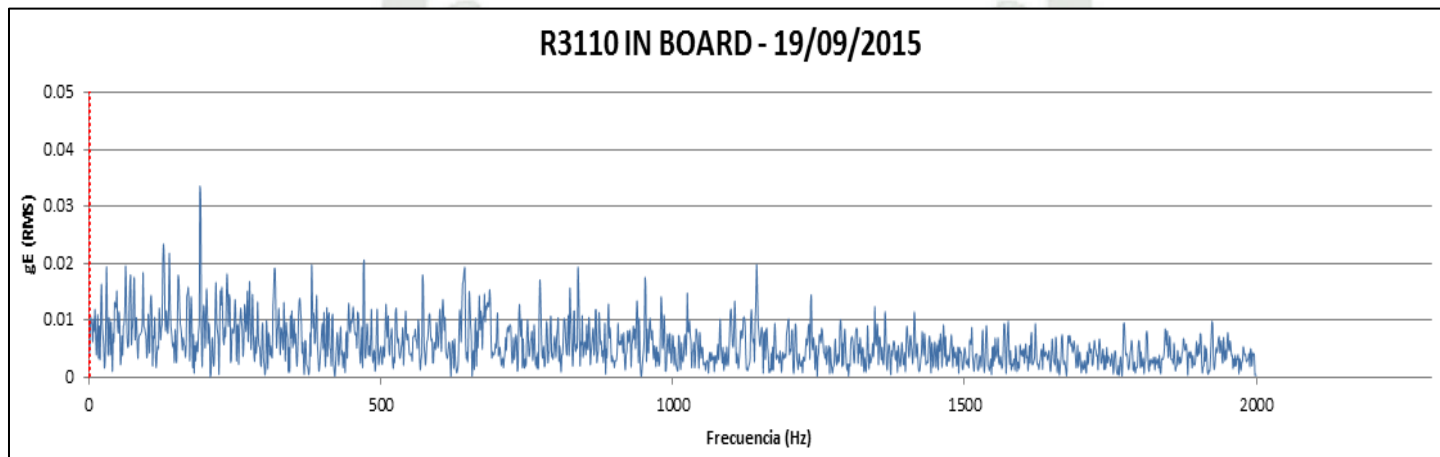


R3110 IN BOARD - 17/09/2015

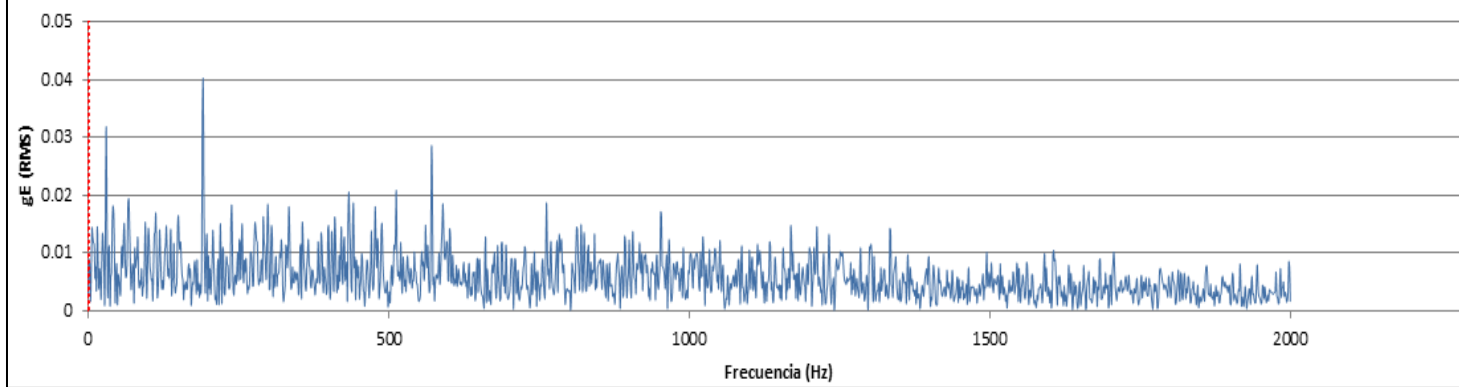


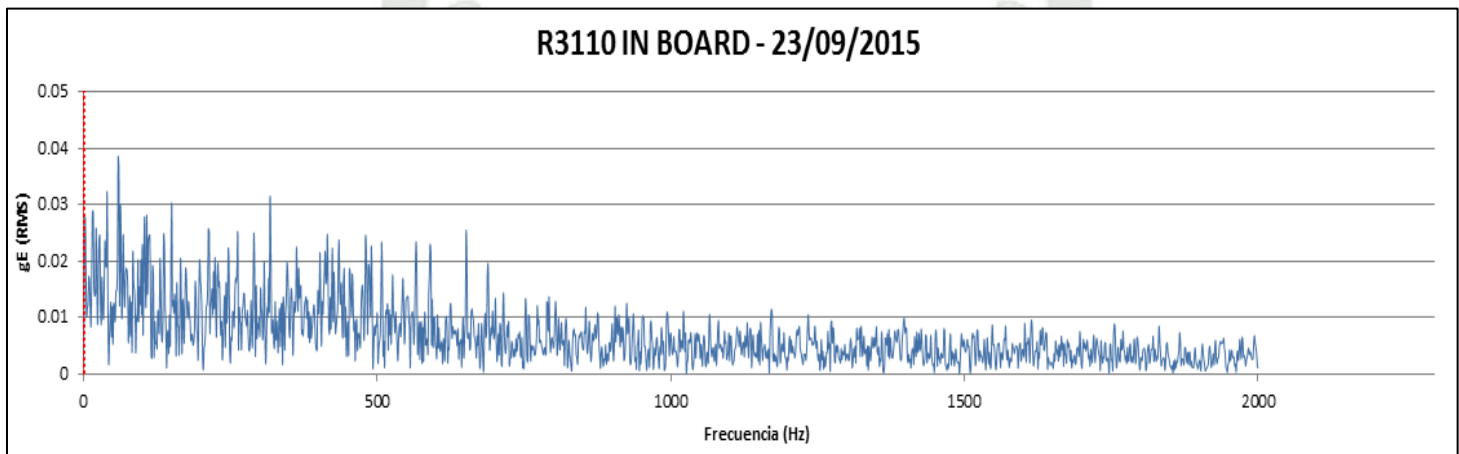
R3110 IN BOARD - 18/09/2015

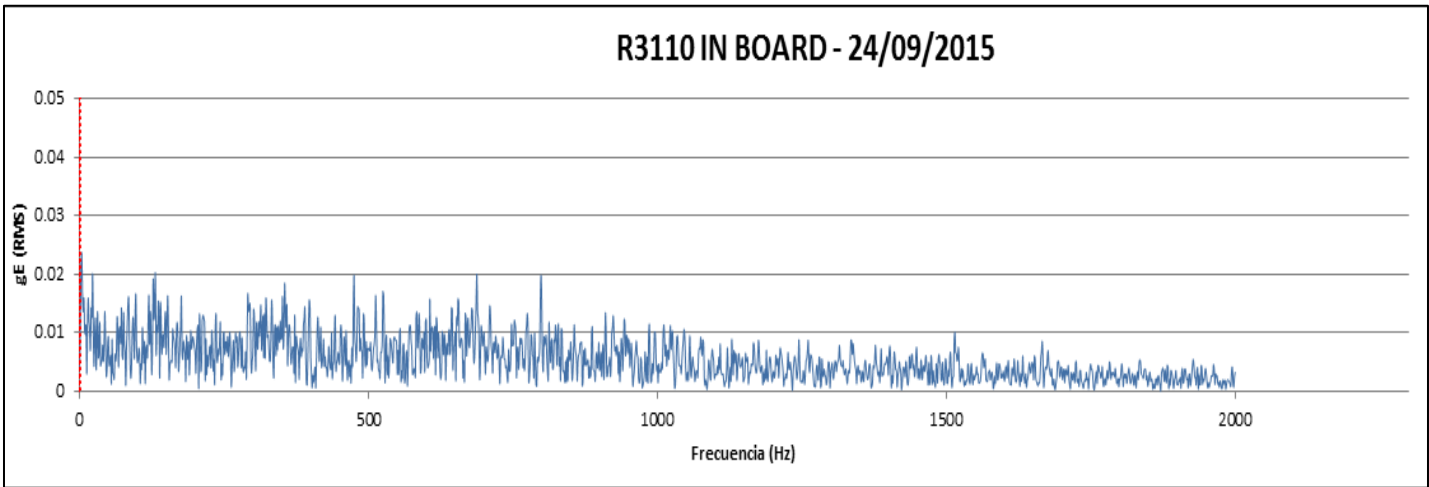




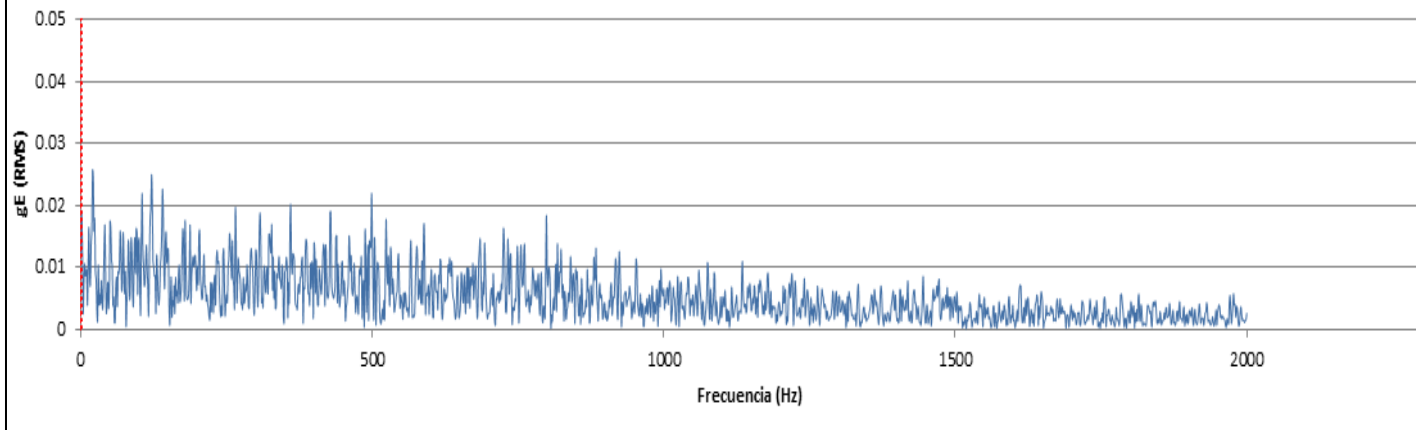
R3110 IN BOARD - 21/09/2015

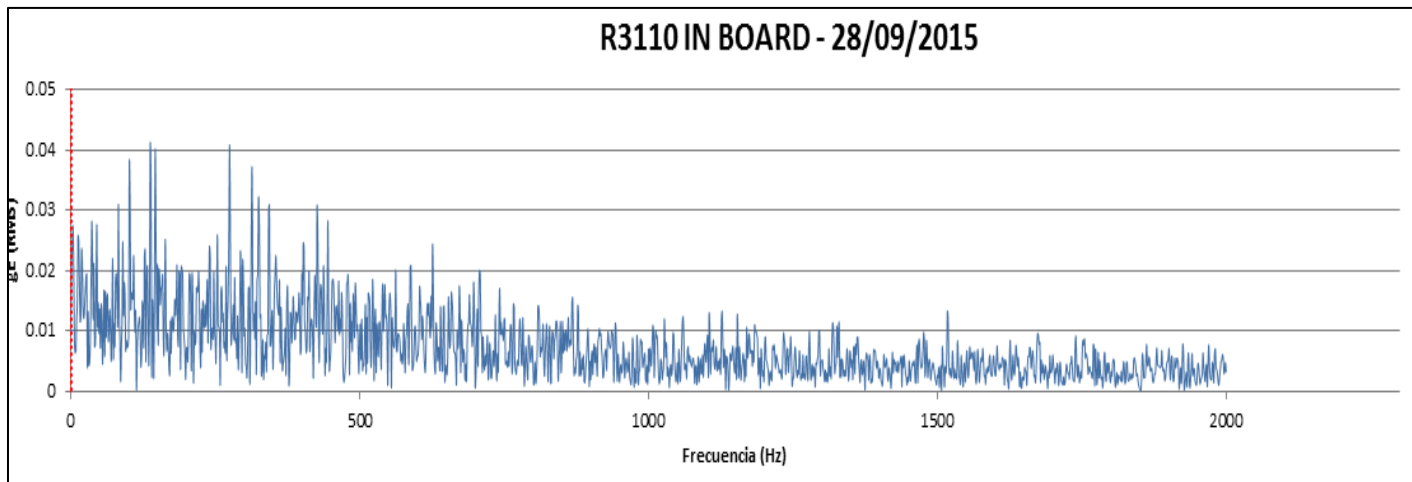






R3110 IN BOARD - 25/09/2015

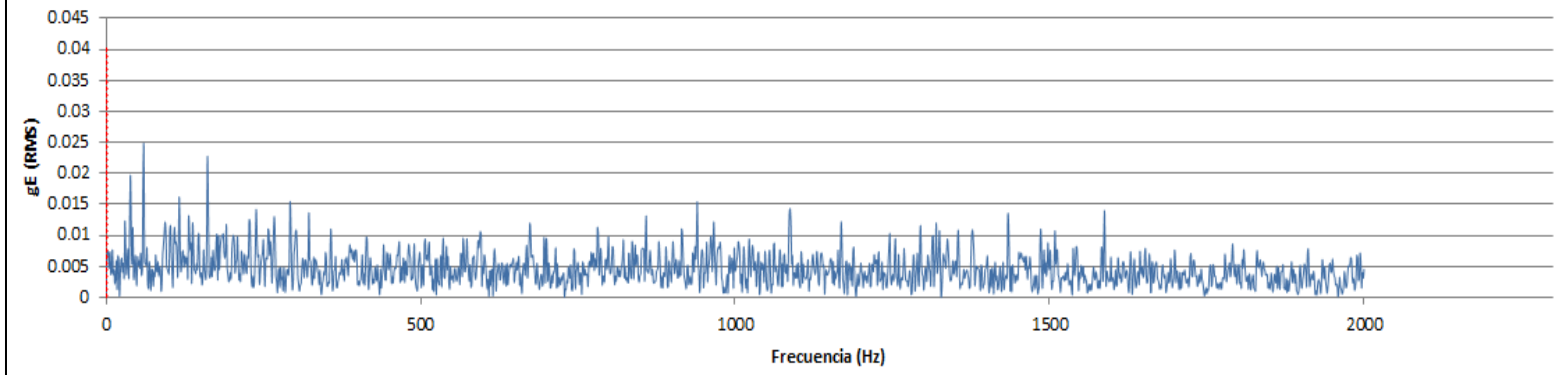




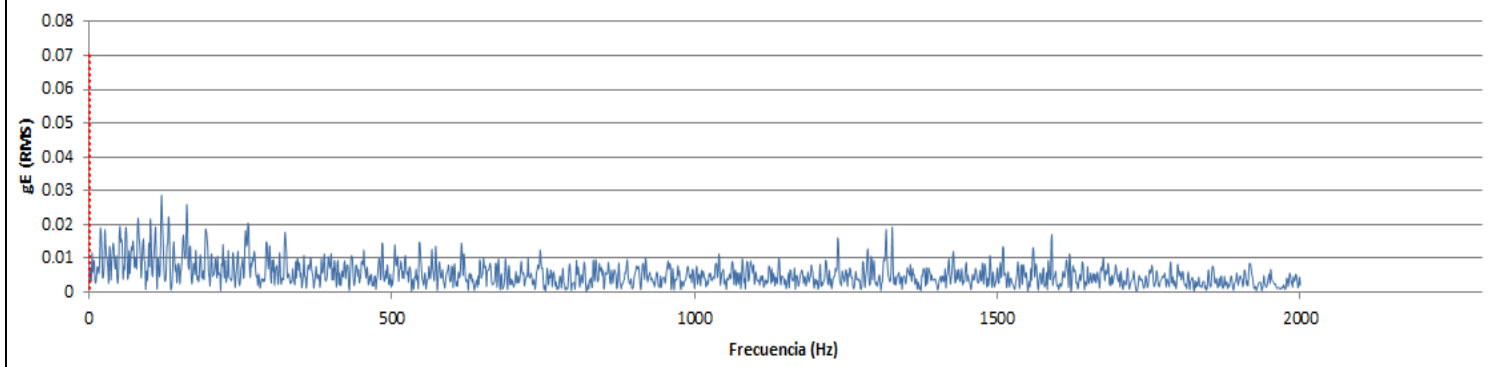
ANEXO XVIII – ESPECTROS MOTOR R3110 OUT BOARD

ANEXO 18 – ESPECTROS MOTOR R3110 OUT BOARD

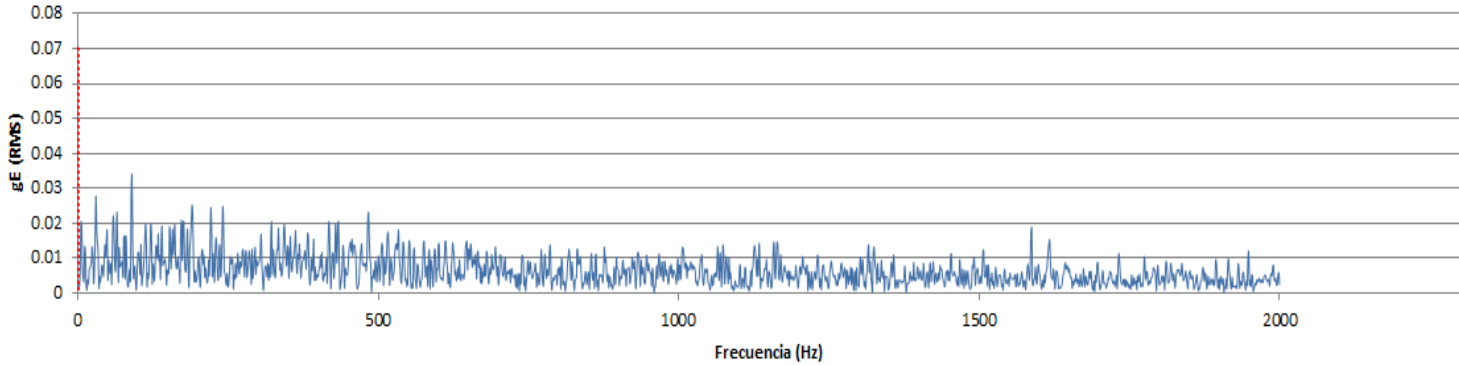
R3110 OUT BOARD -12/09/2015



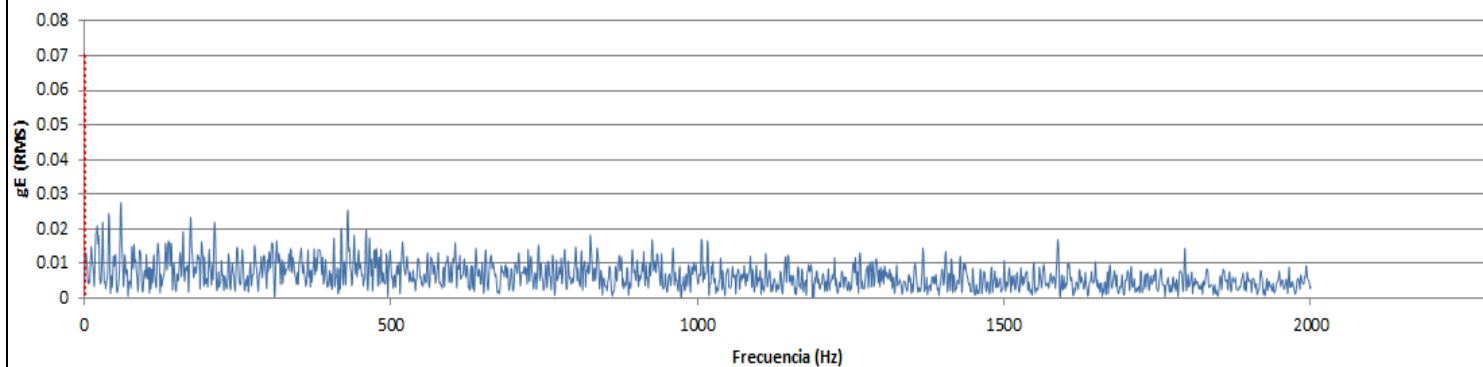
R3110 OUT BOARD - 13/09/2015



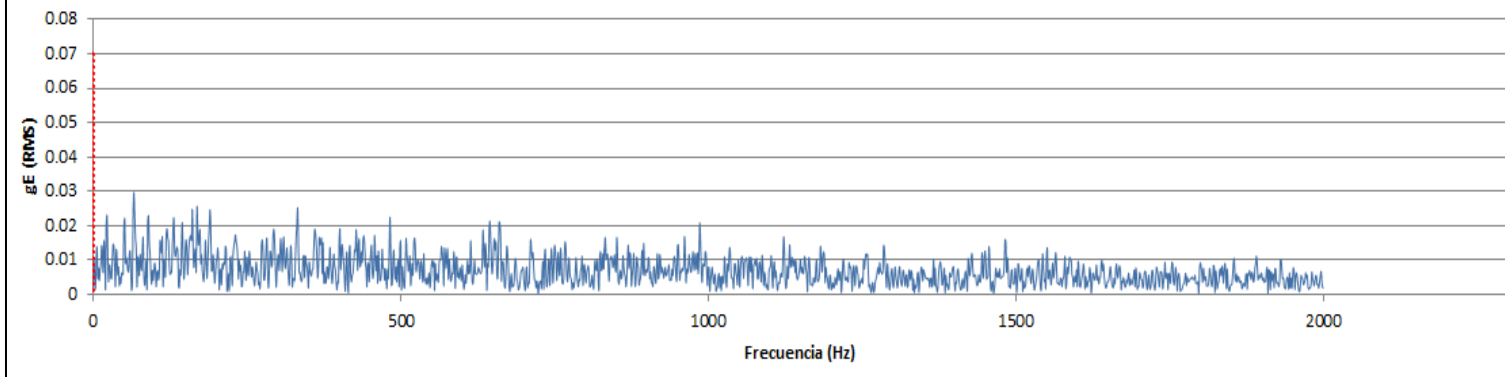
R3110 OUT BOARD - 14/09/2015



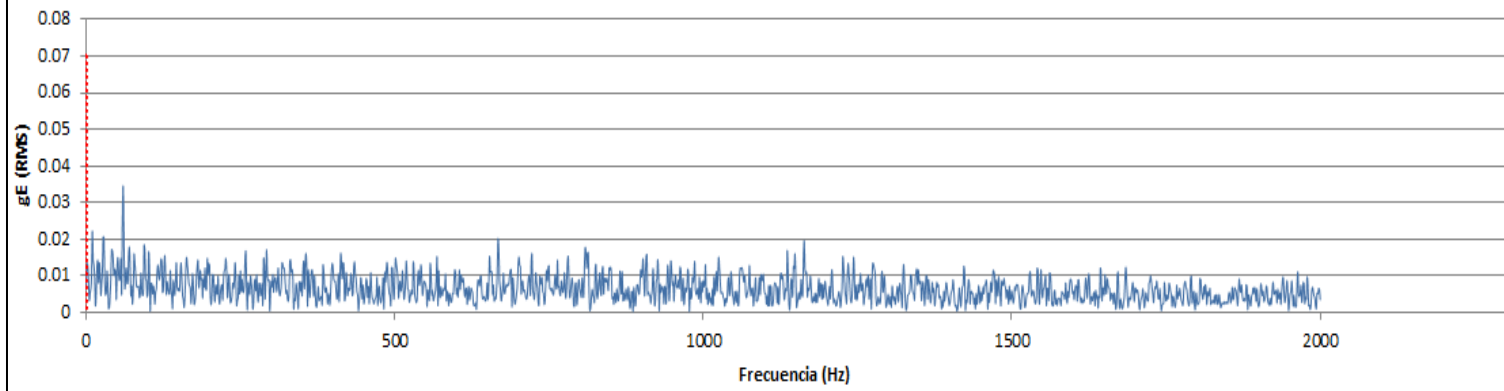
R3110 OUT BOARD - 15/09/2015



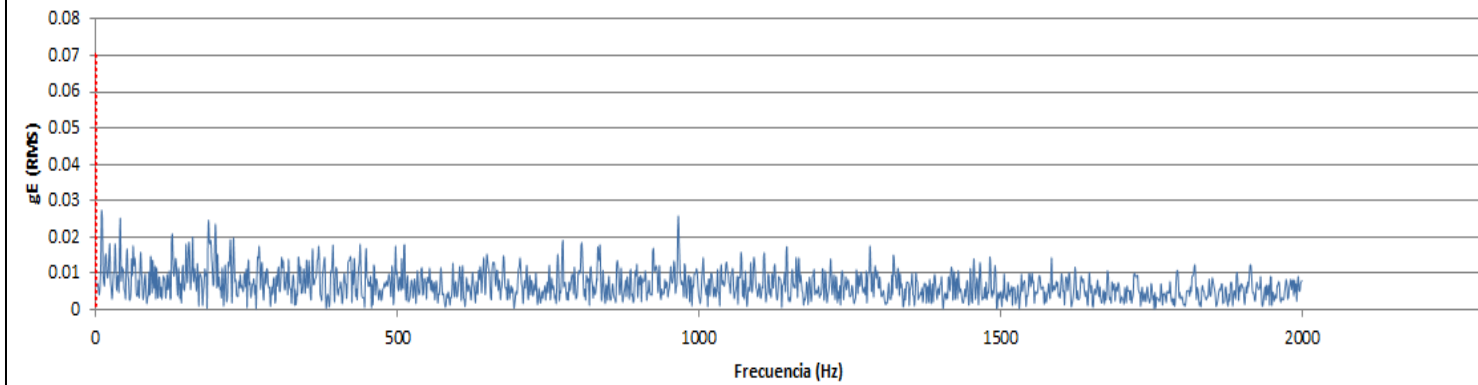
R3110 OUT BOARD - 16/09/2015



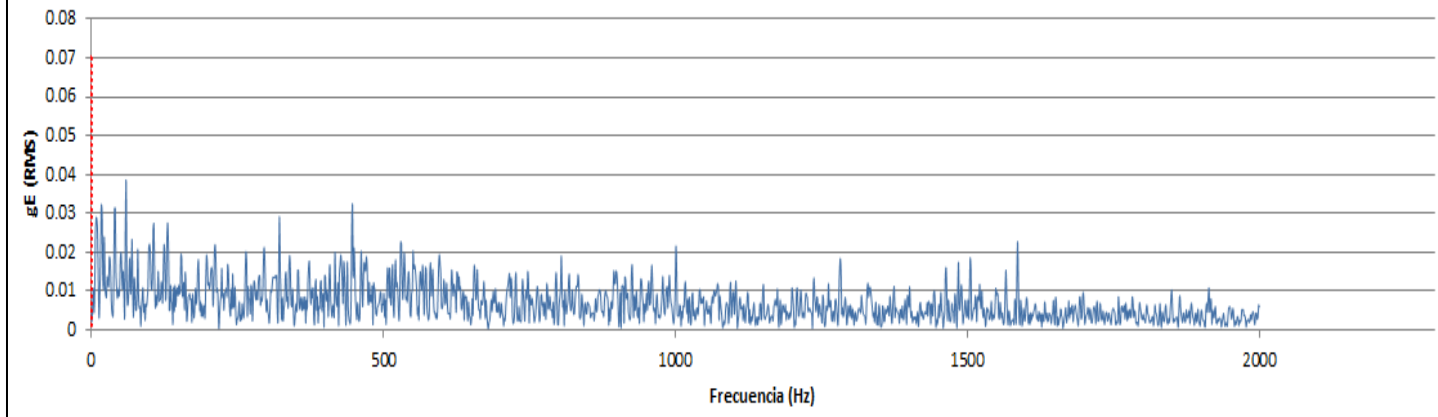
R3110 OUT BOARD - 17/09/2015



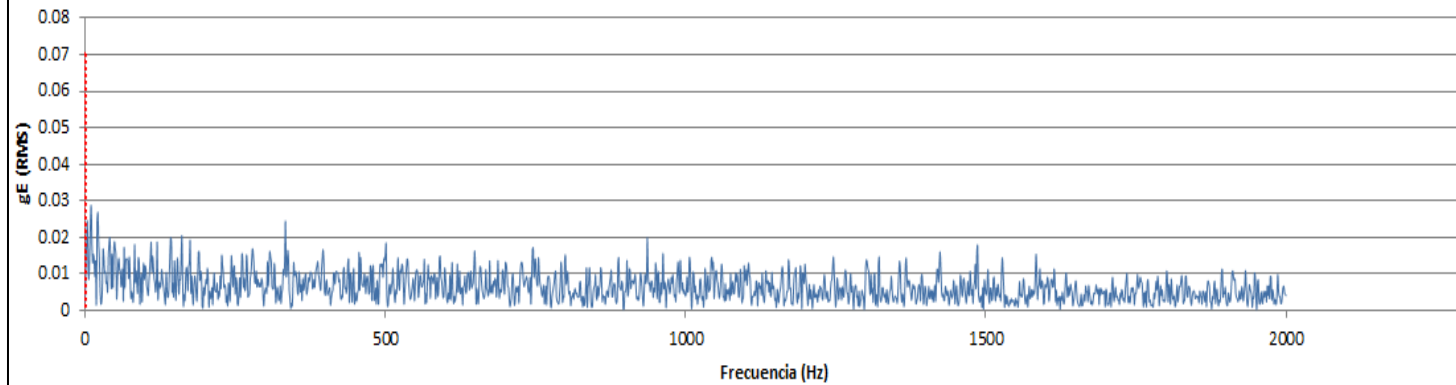
R3110 OUT BOARD - 18/09/2015



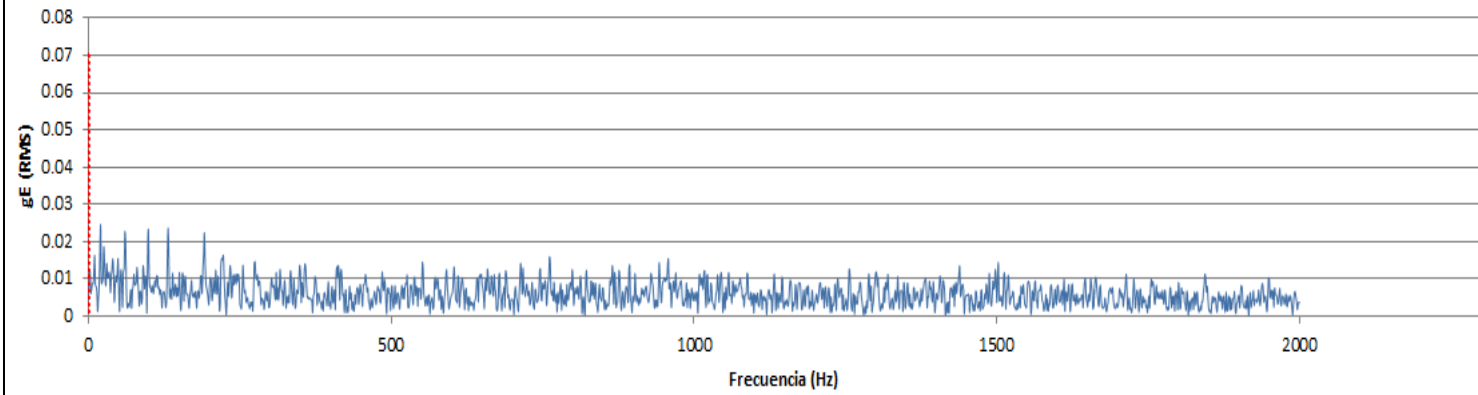
R3110 OUT BOARD - 19/09/2015



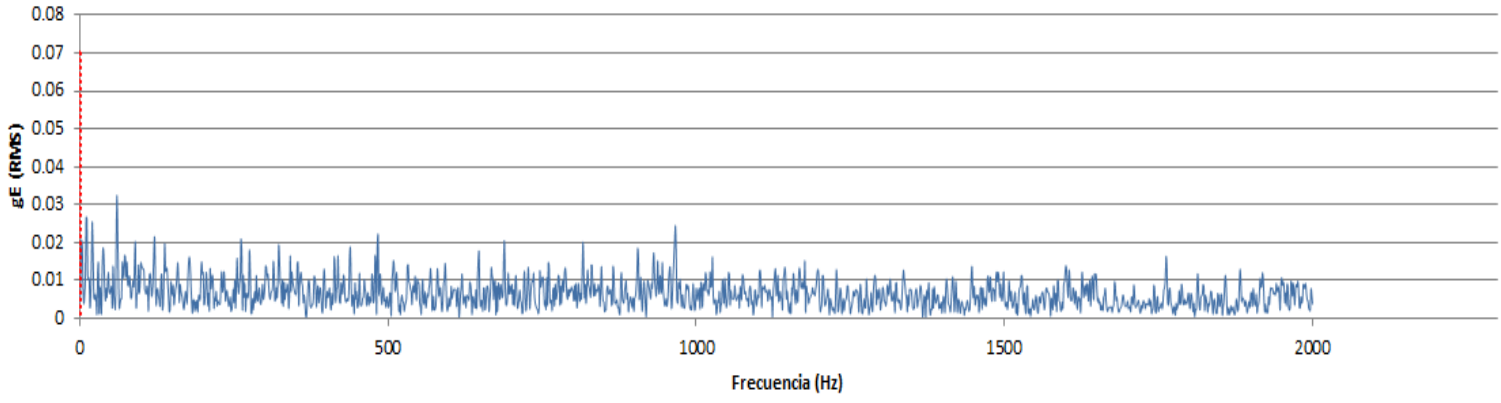
R3110 OUT BOARD - 21/09/2015



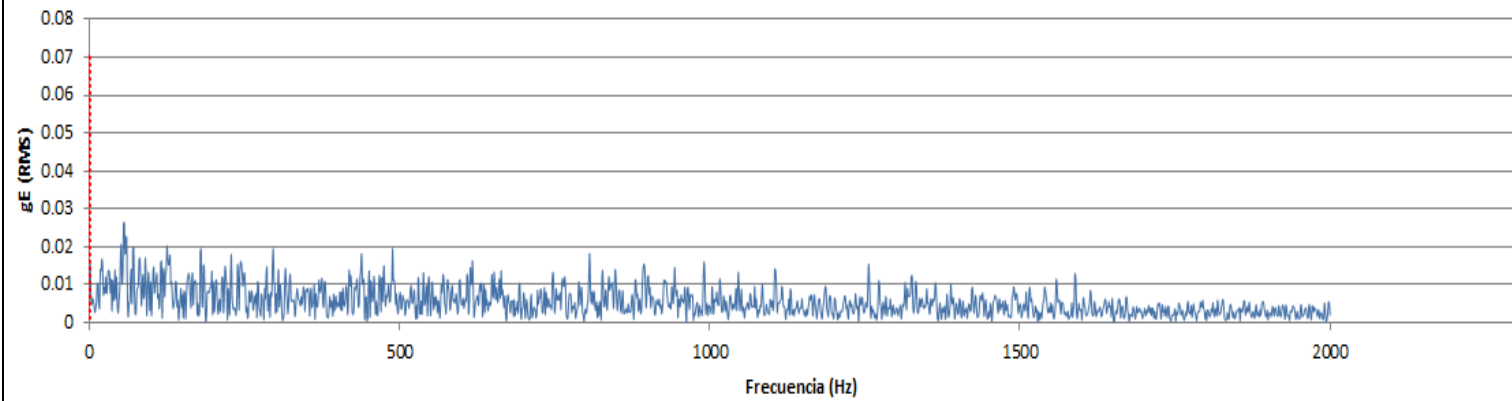
R3110 OUT BOARD - 22/09/2015



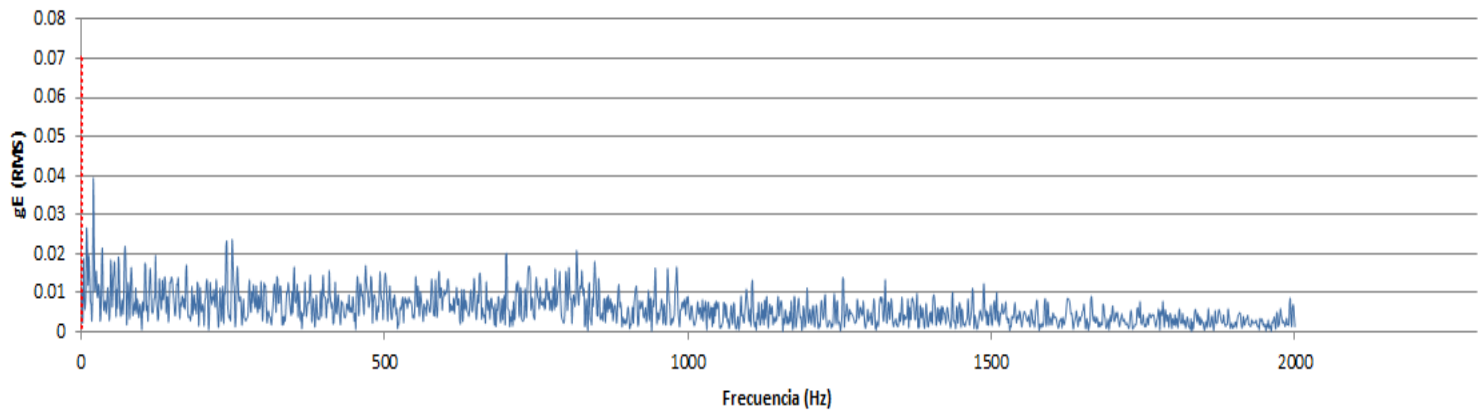
R3110 OUT BOARD - 23/09/2015



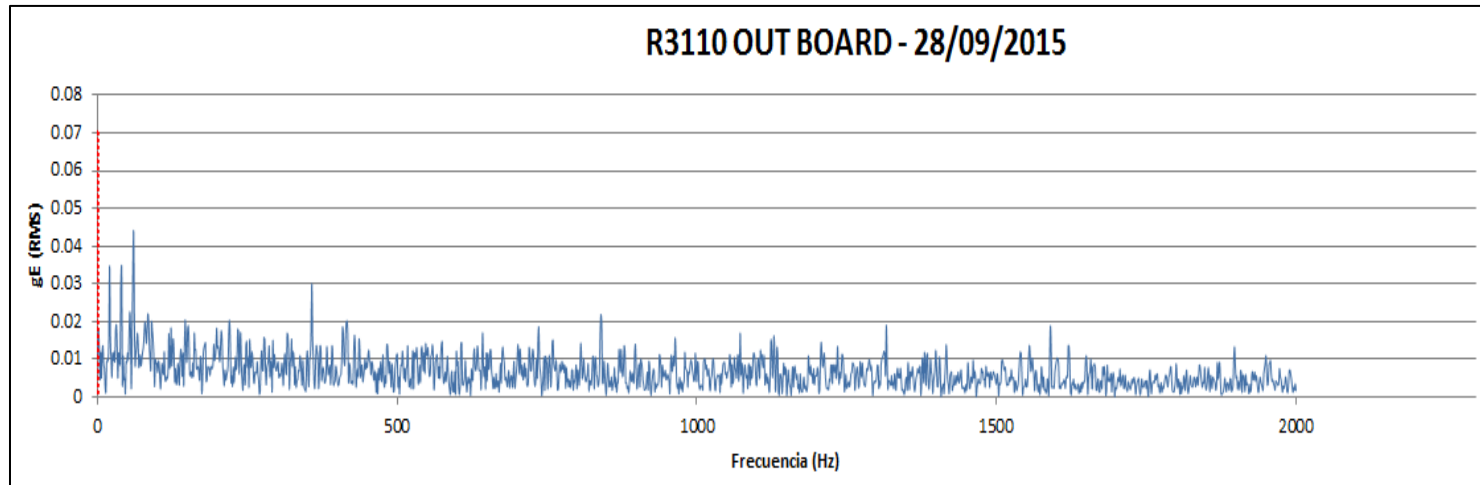
R3110 OUT BOARD - 24/09/2015



R3110 OUT BOARD - 25/09/2015



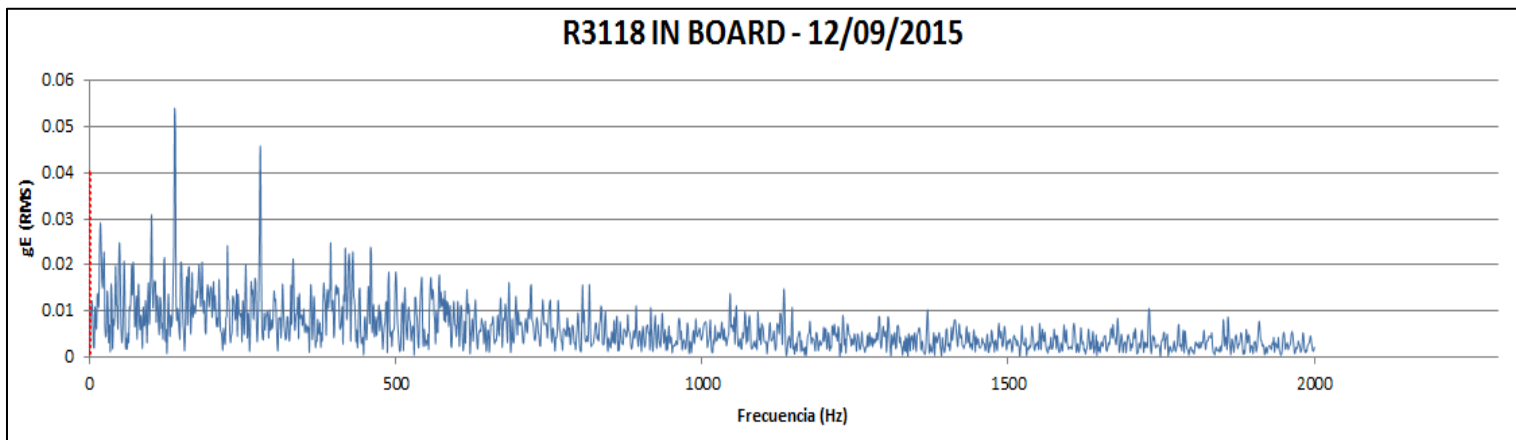
R3110 OUT BOARD - 28/09/2015



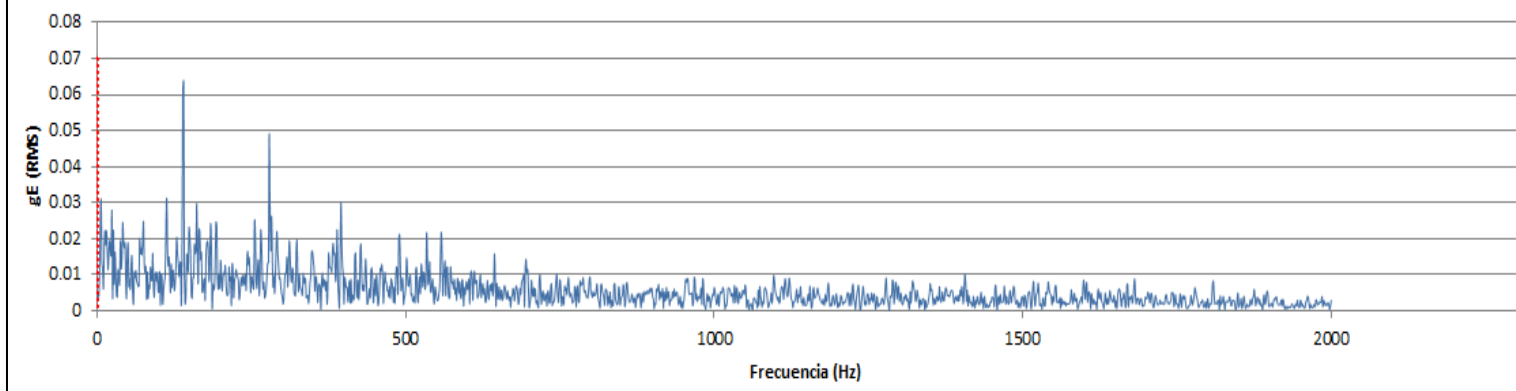
ANEXO XIX – ESPECTROS MOTOR R3118 IN BOARD



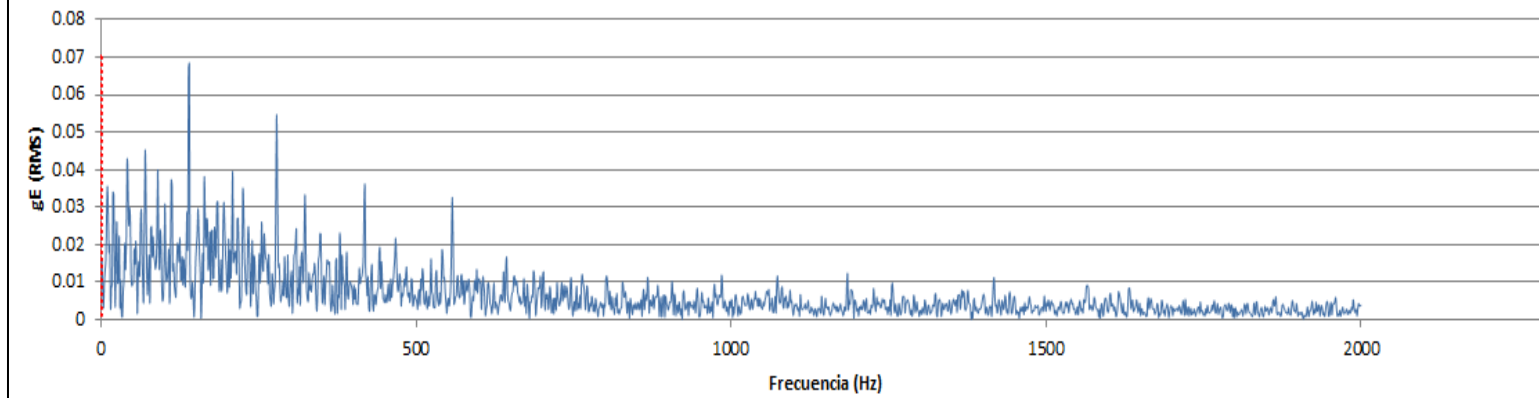
ANEXO 19 – ESPECTROS MOTOR R3118 IN BOARD



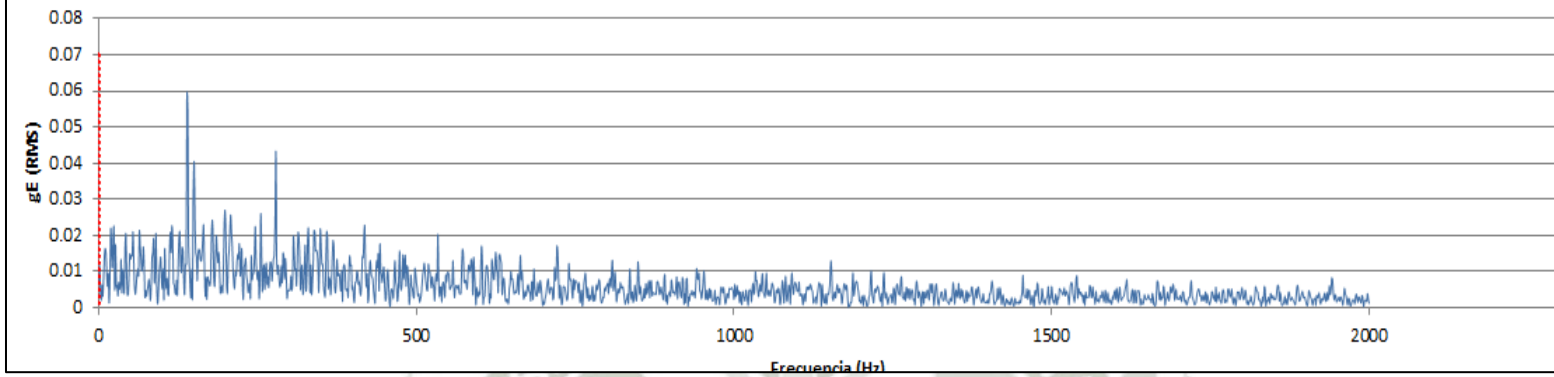
R3118 IN BOARD - 13/09/2015



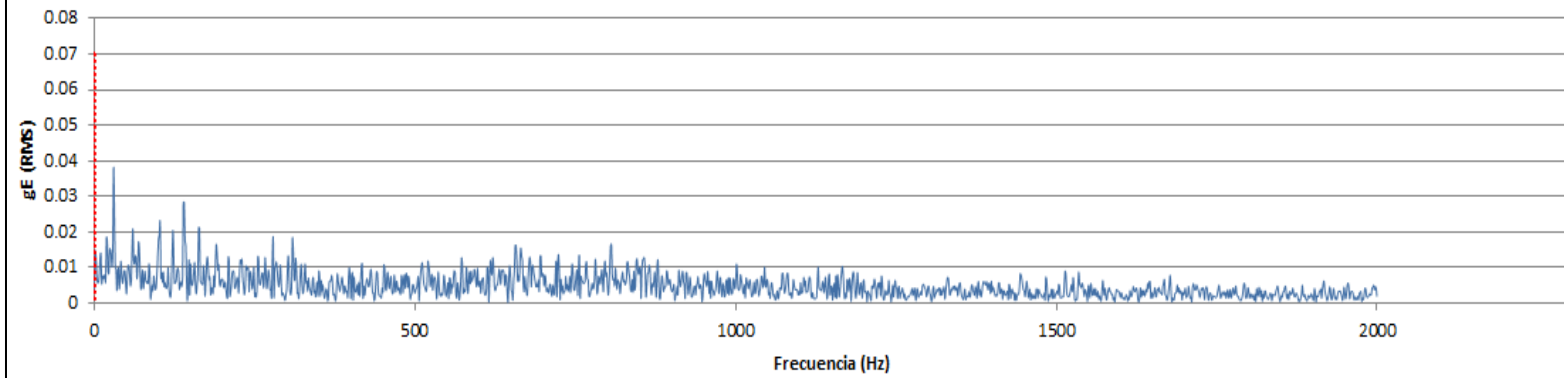
R3118 IN BOARD - 14/09/2015



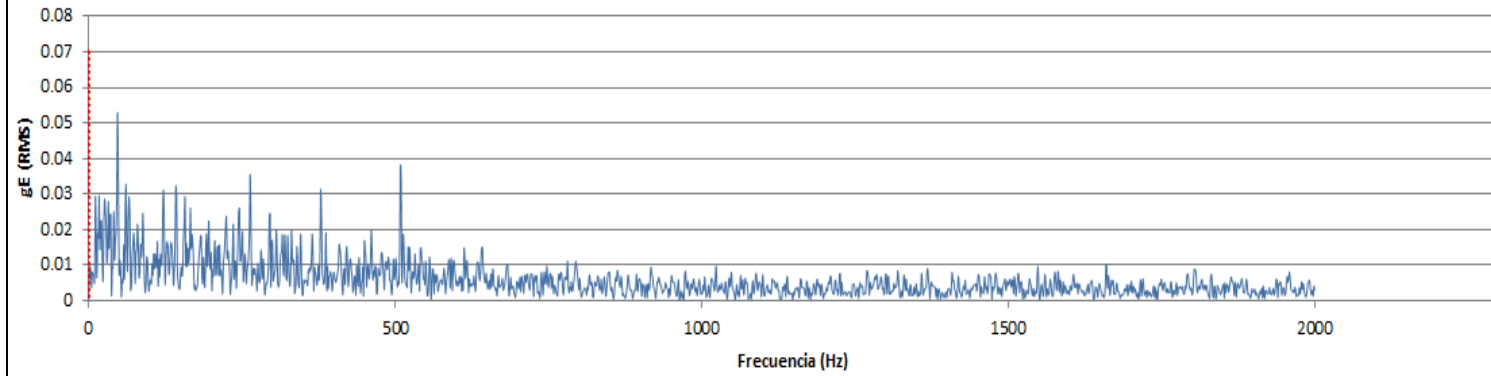
R3118 IN BOARD - 15/09/2015

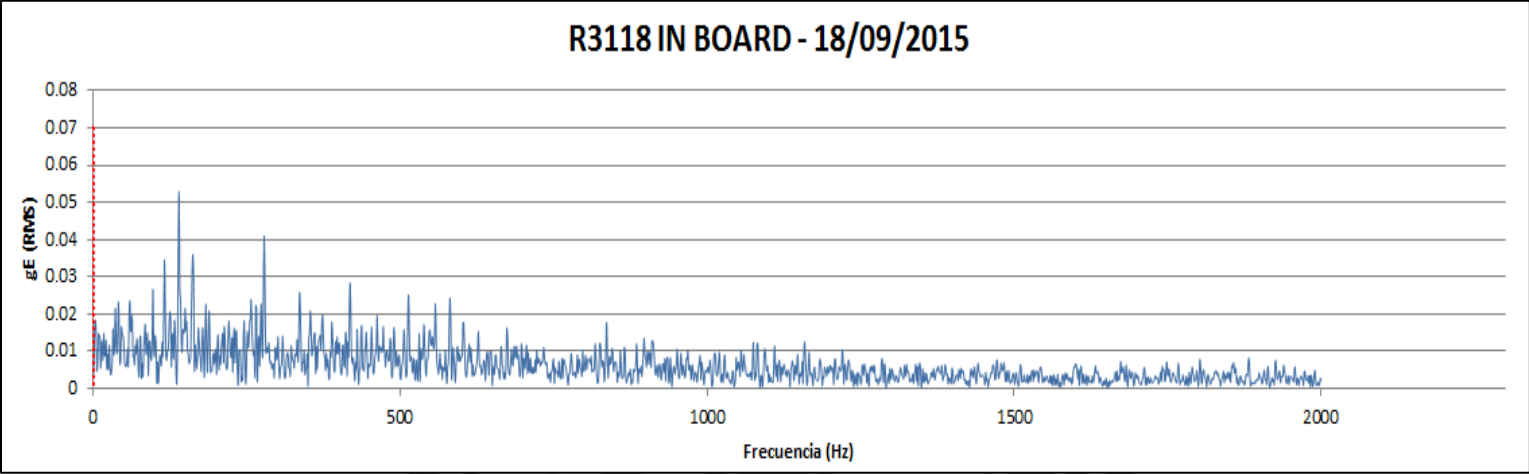


R3118 IN BOARD - 16/09/2015

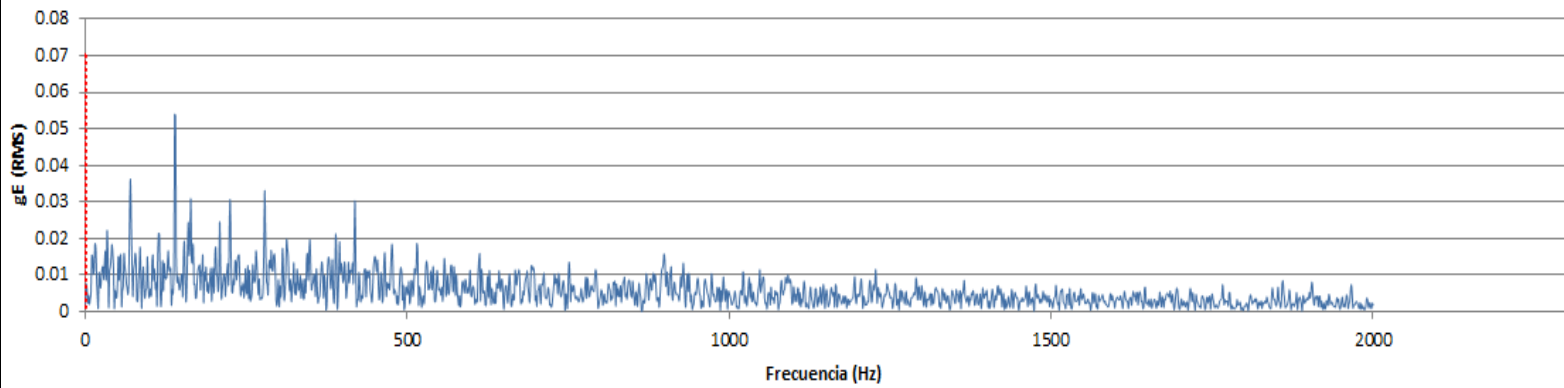


R3118 IN BOARD - 17/09/2015

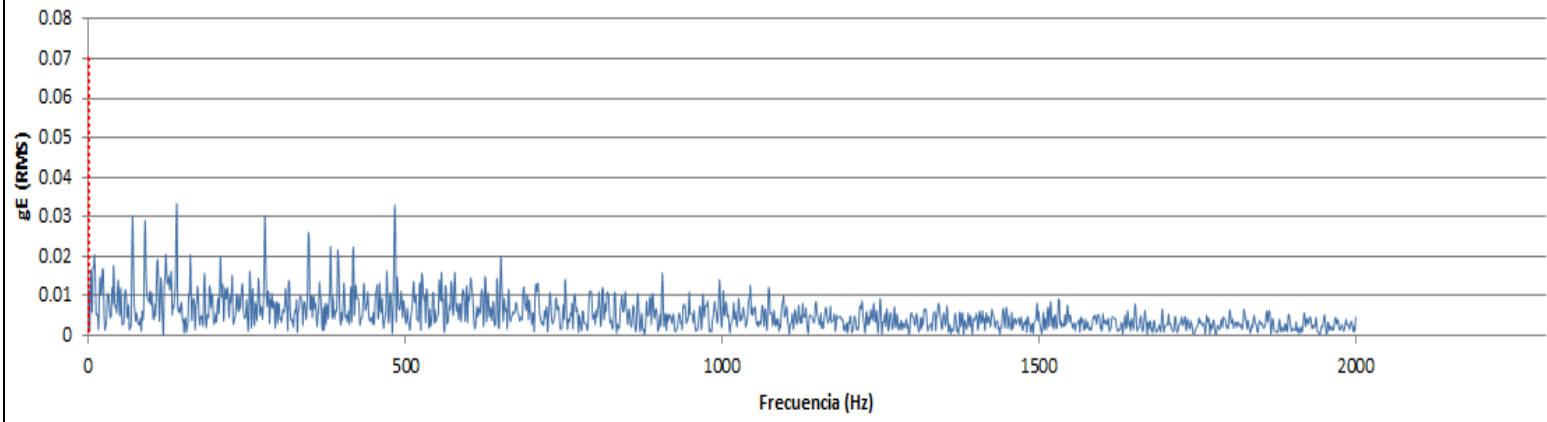





R3118 IN BOARD - 19/09/2015



R3118 IN BOARD - 21/09/2015

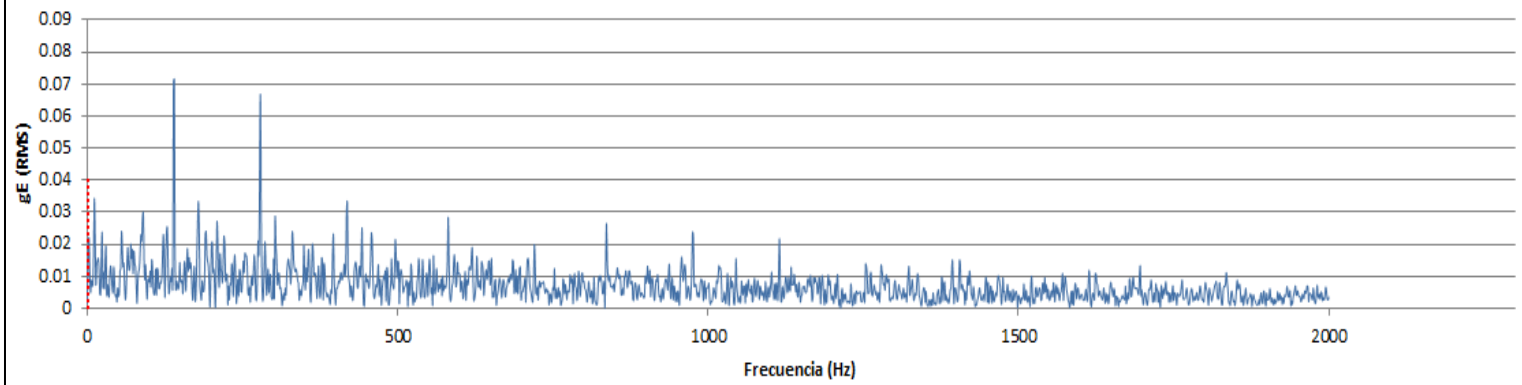




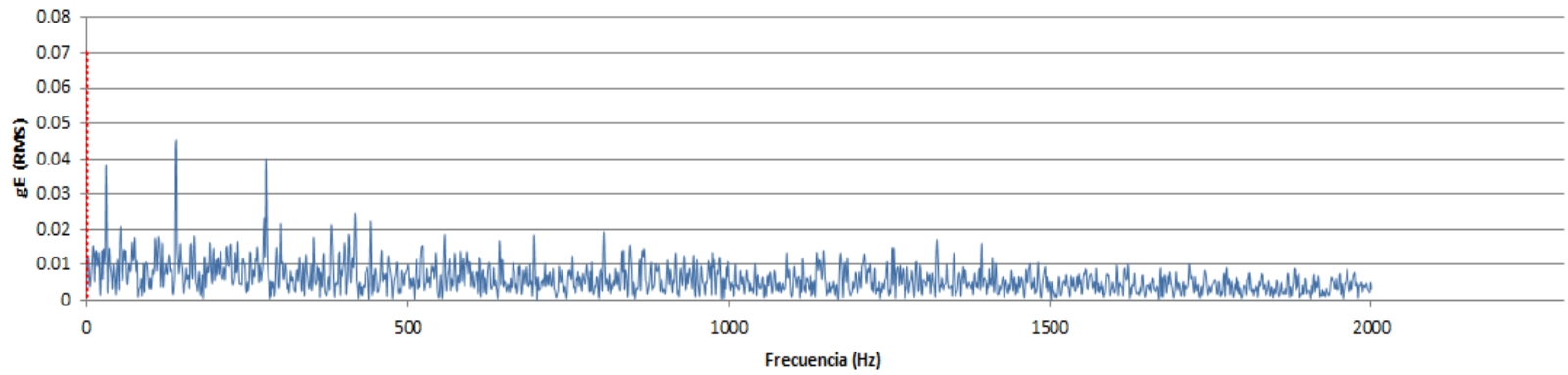
ANEXO XX – ESPECTROS MOTOR R3118 OUT BOARD

ANEXO 20 – ESPECTROS MOTOR R3118 OUT BOARD

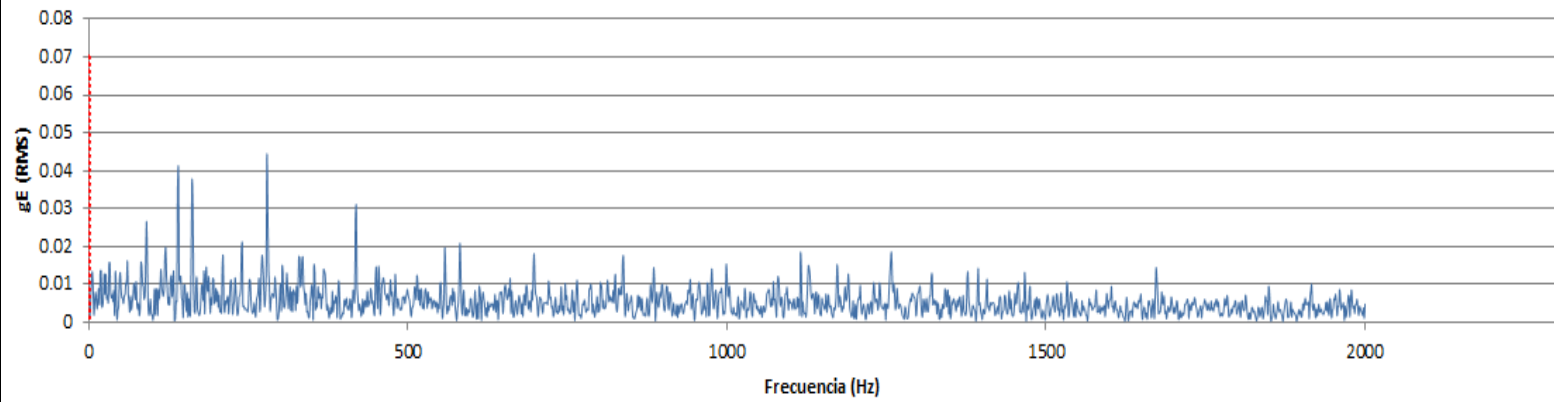
R3118 OUT BOARD - 12/09/2015



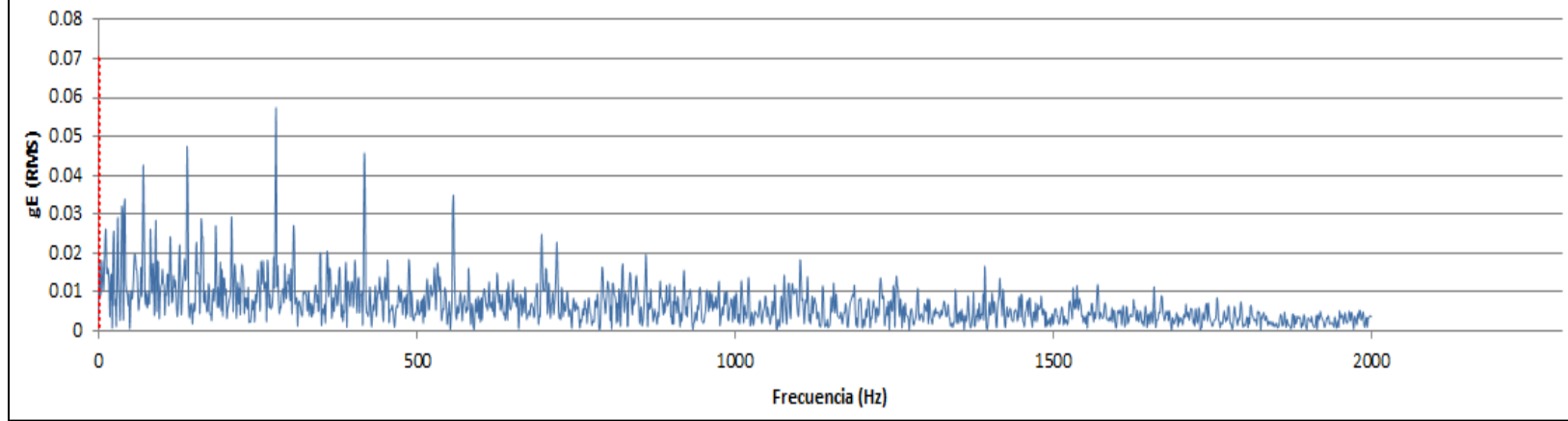
R3118 OUT BOARD - 13/09/2015



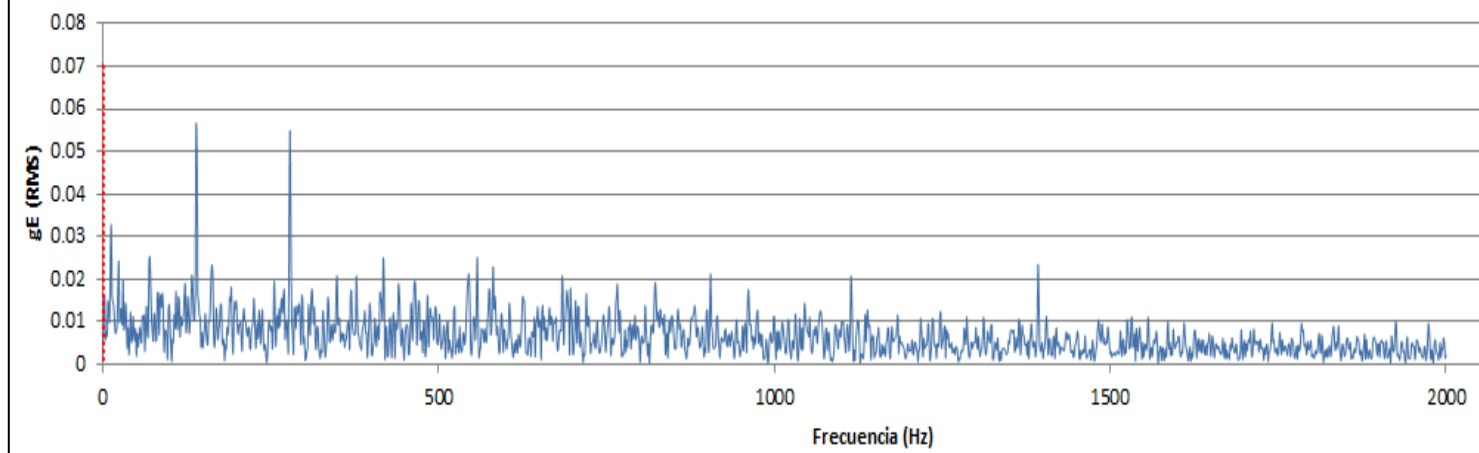
R3118 OUT BOARD - 14/09/2015



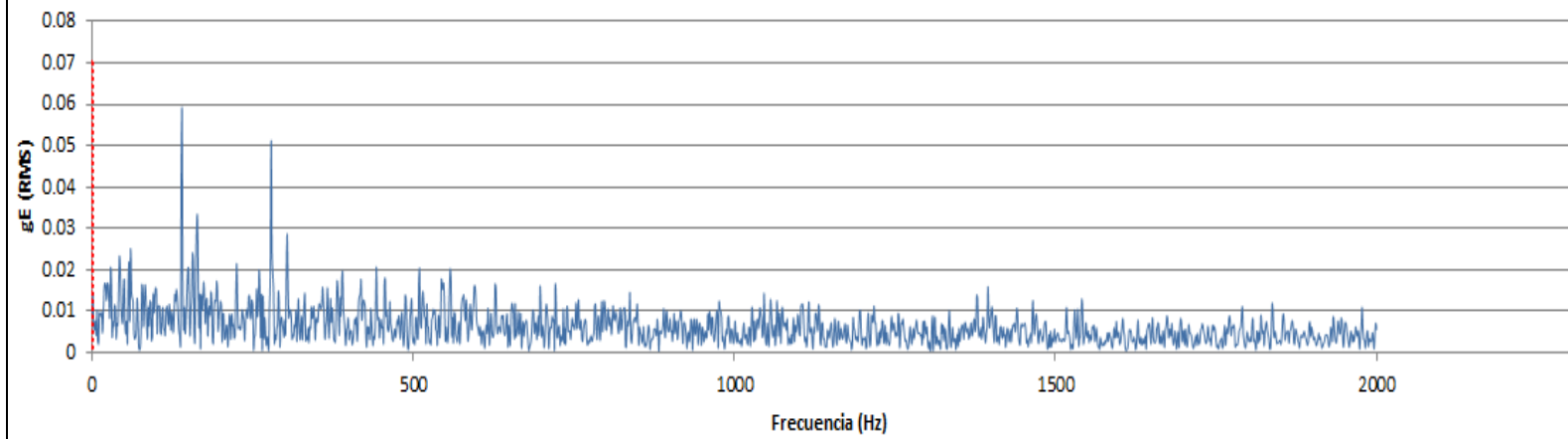
R3118 OUT BOARD - 15/09/2015



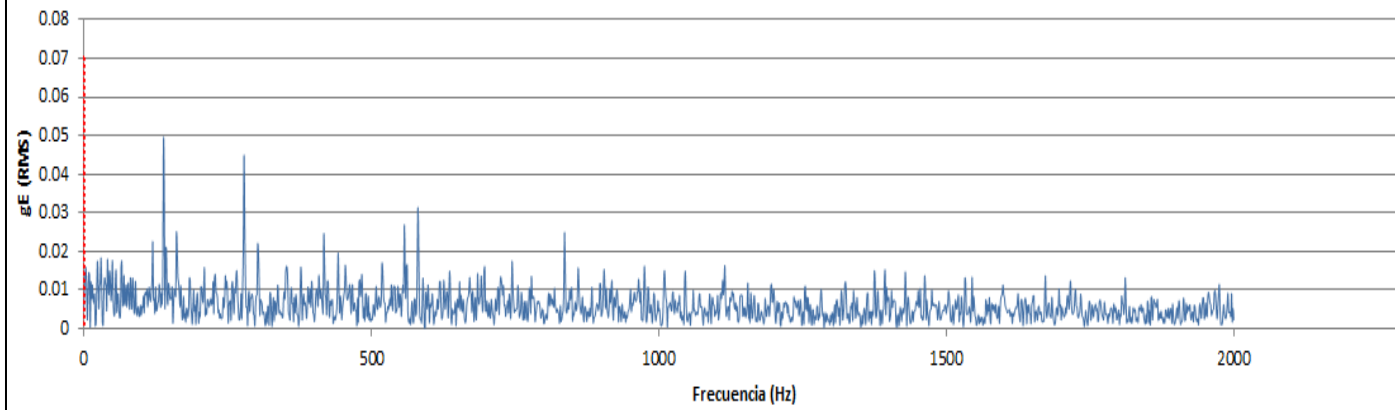
R3118 OUT BOARD - 16/09/2015



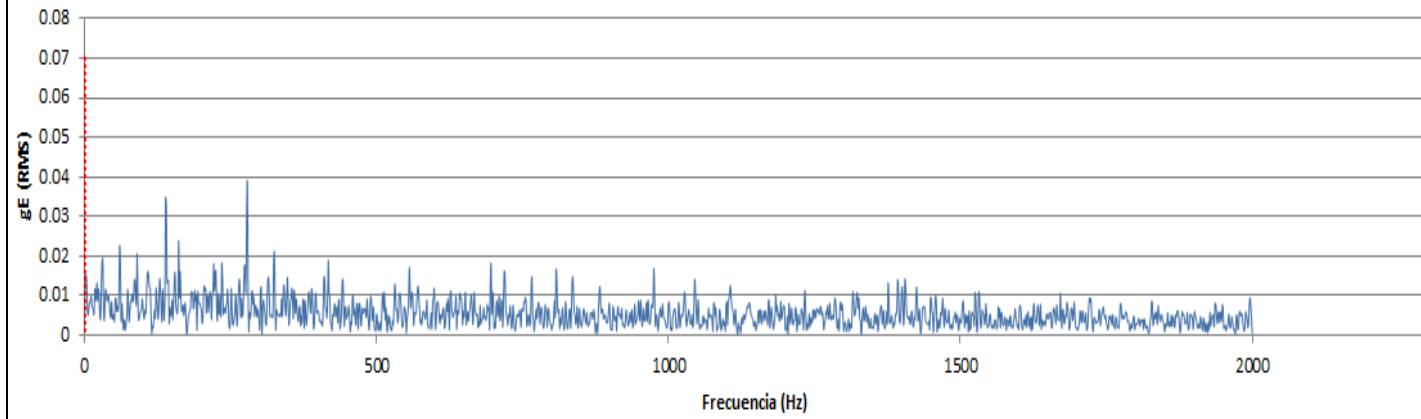
R3118 OUT BOARD - 17/09/2015



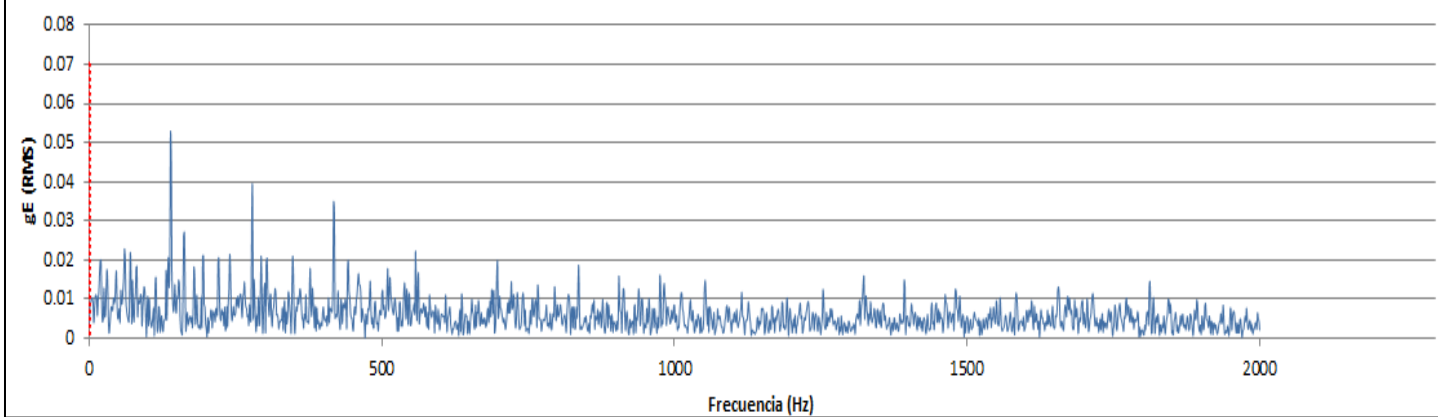
R3118 OUT BOARD - 18/09/2015



R3118 OUT BOARD - 19/09/2015



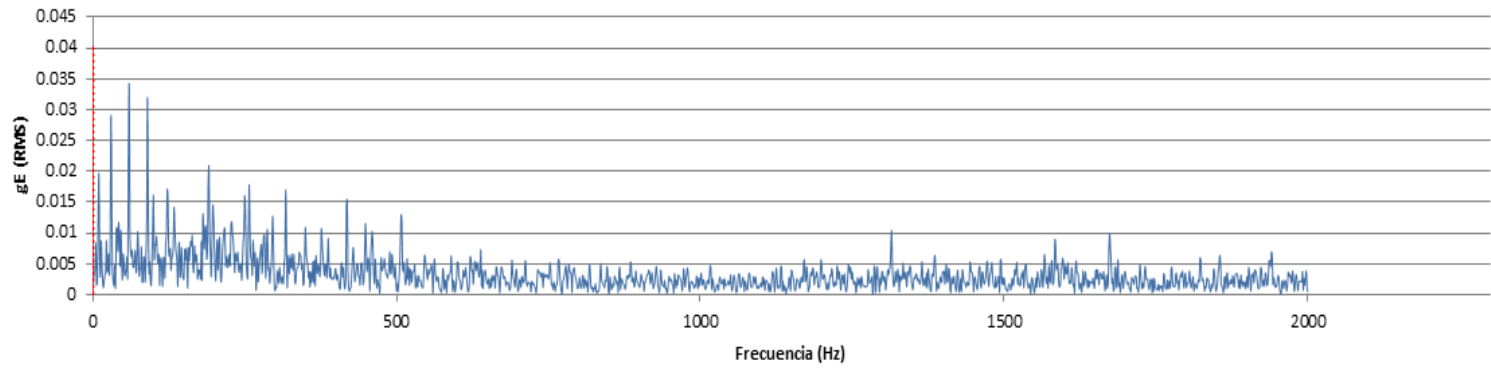
R3118 OUT BOARD - 21/09/2015



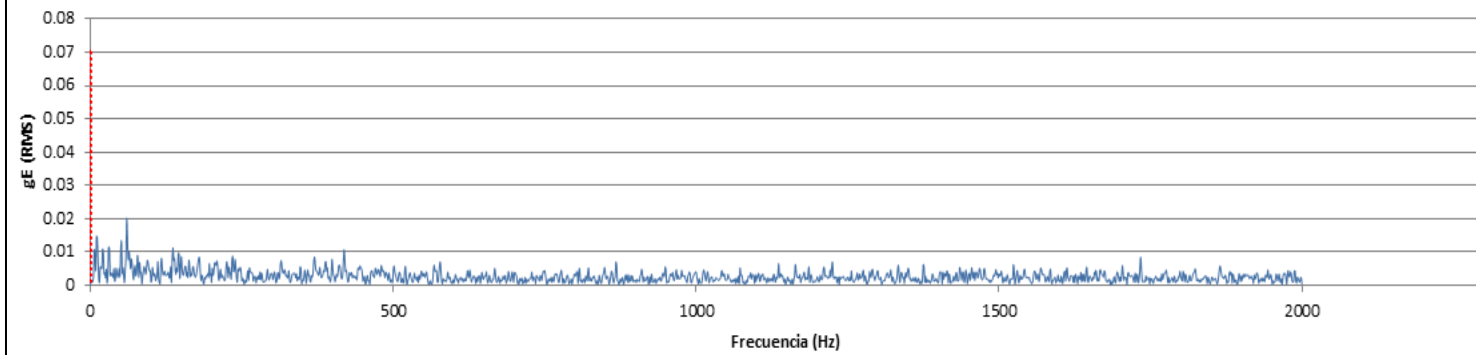
ANEXO XXI – ESPECTROS MOTOR R3119 IN BOARD

ANEXO 21 – ESPECTROS MOTOR R3119 IN BOARD

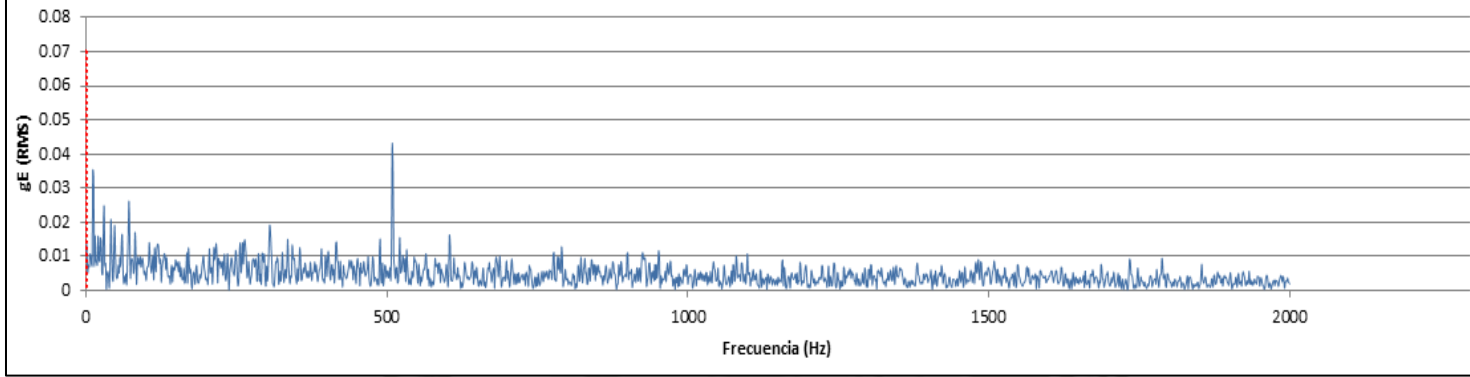
R3119 IN BOARD - 12/09/2015



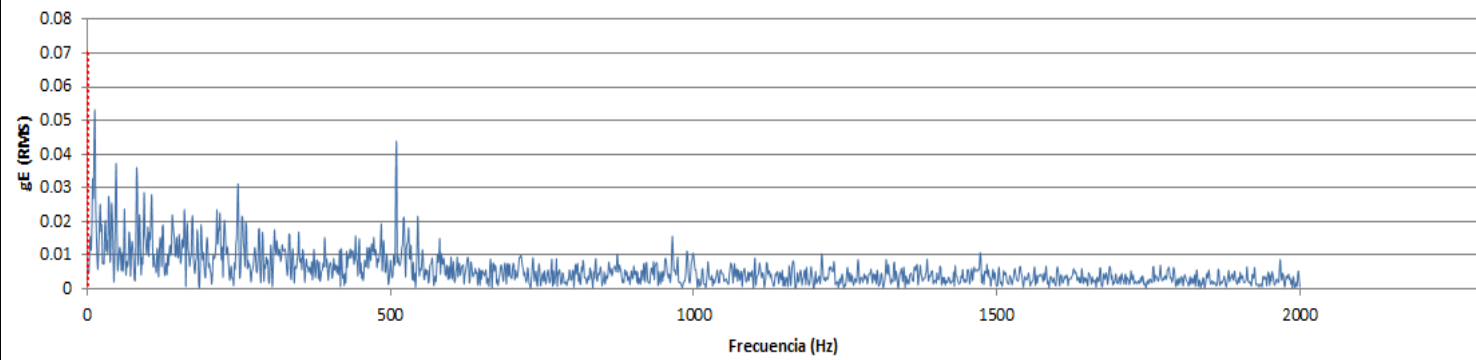
R3119 IN BOARD - 13/09/2015



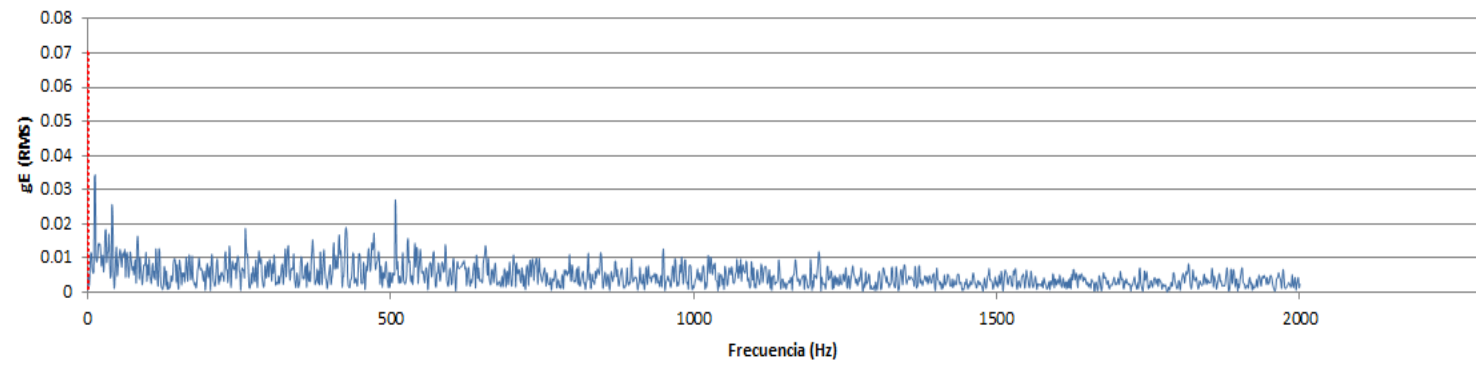
R3119 IN BOARD - 14/09/2015



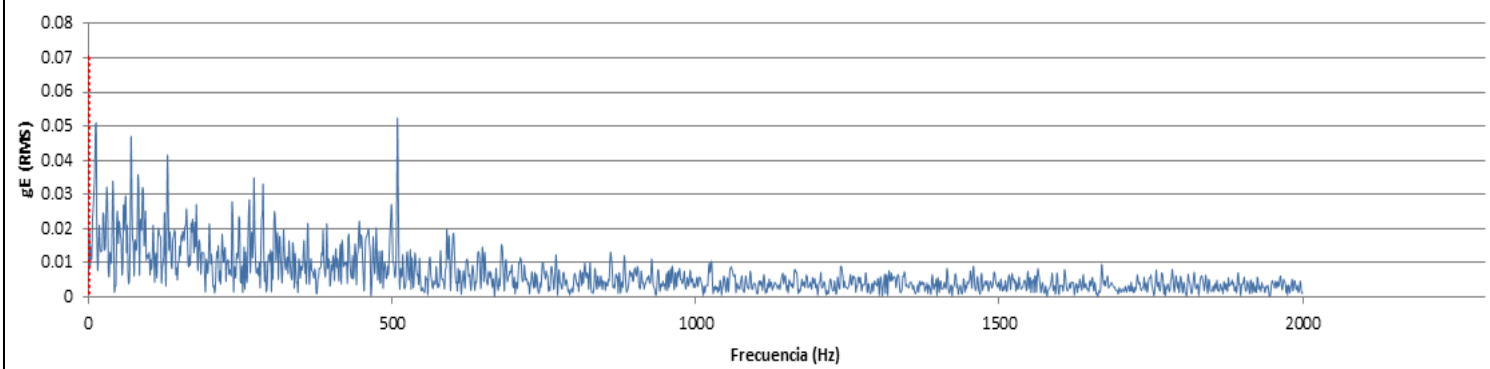
R3119 IN BOARD - 15/09/2015



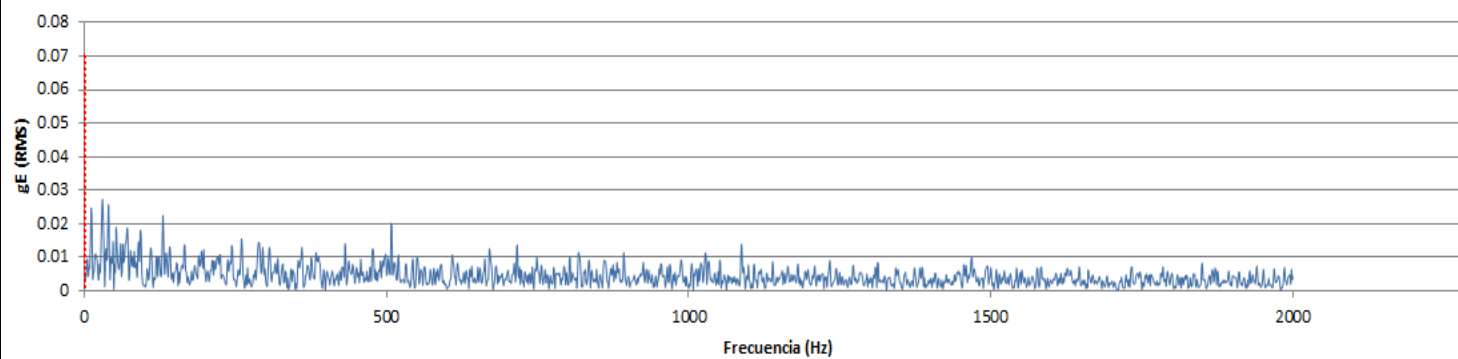
R3119 IN BOARD - 16/09/2015



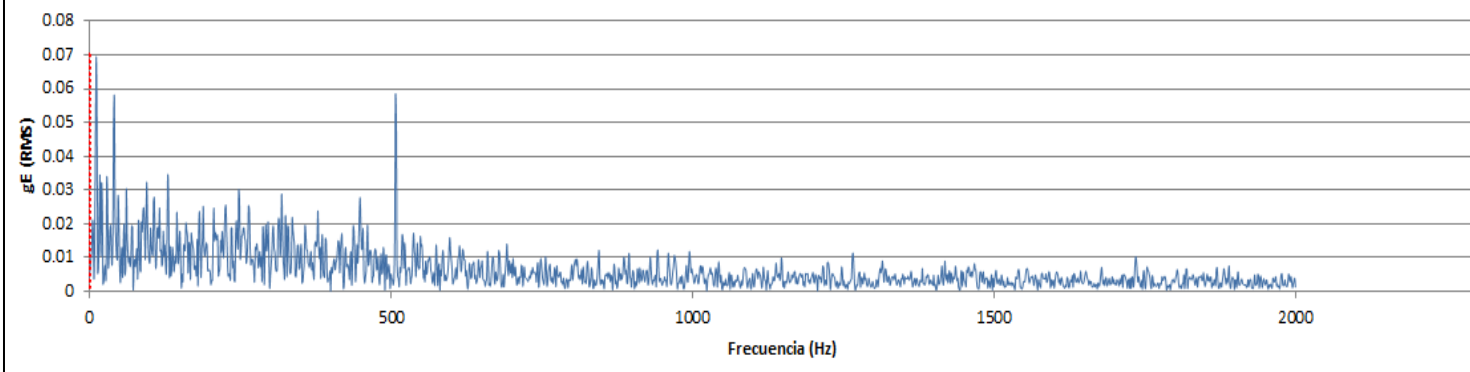
R3119 IN BOARD - 17/09/2015



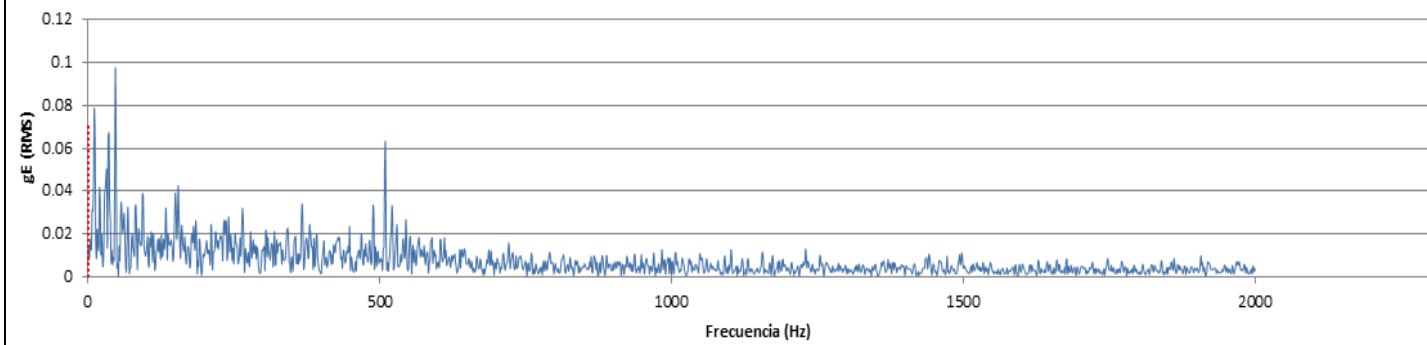
R3119 IN BOARD - 18/09/2015

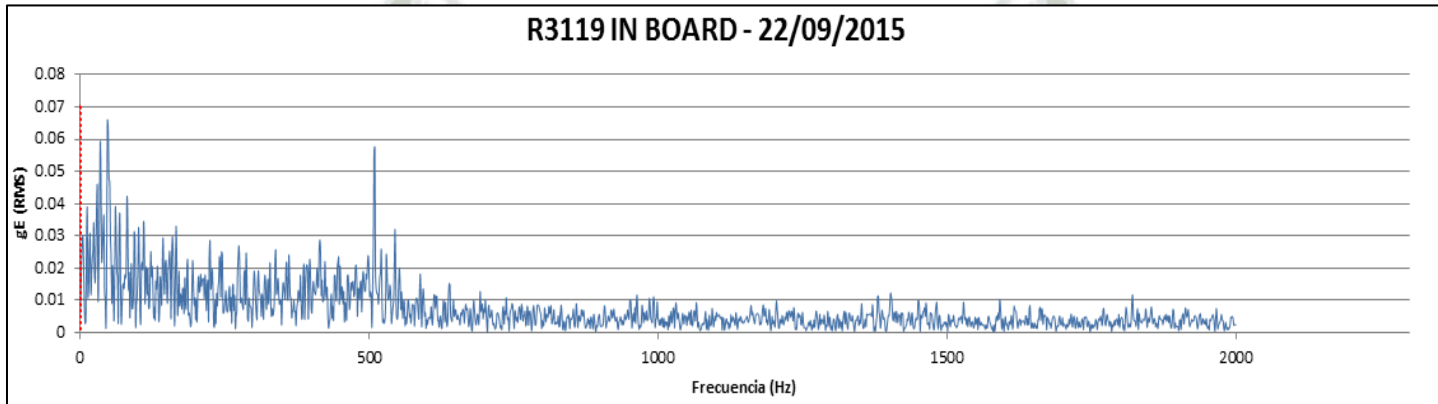


R3119 IN BOARD - 19/09/2015

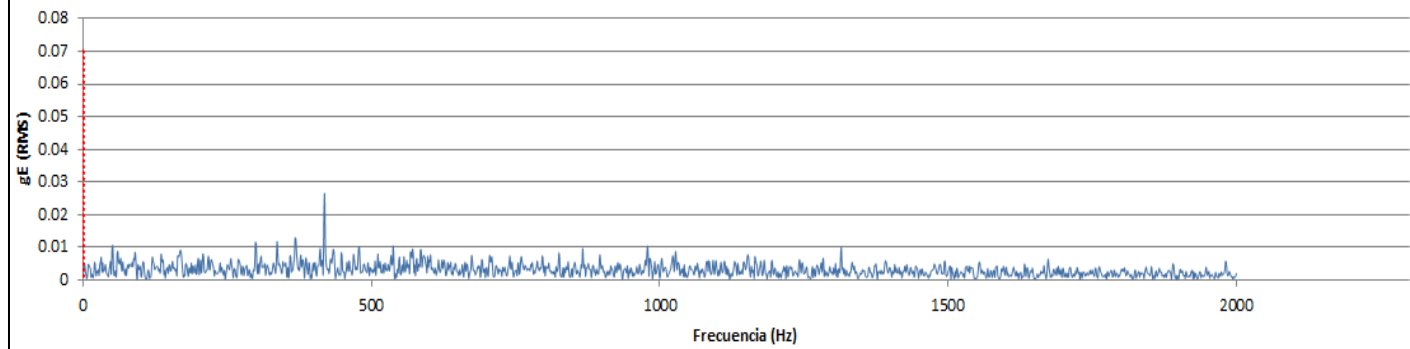


R3119 IN BOARD - 21/09/2015

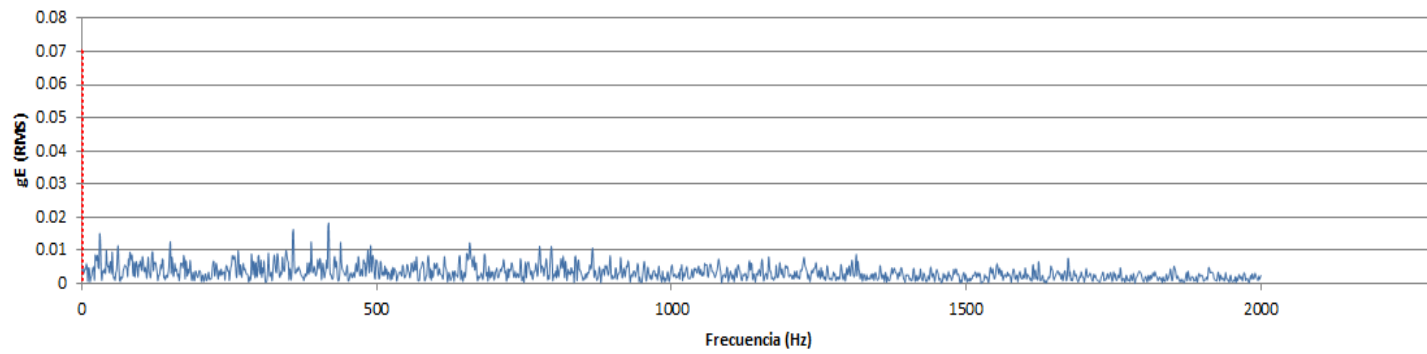




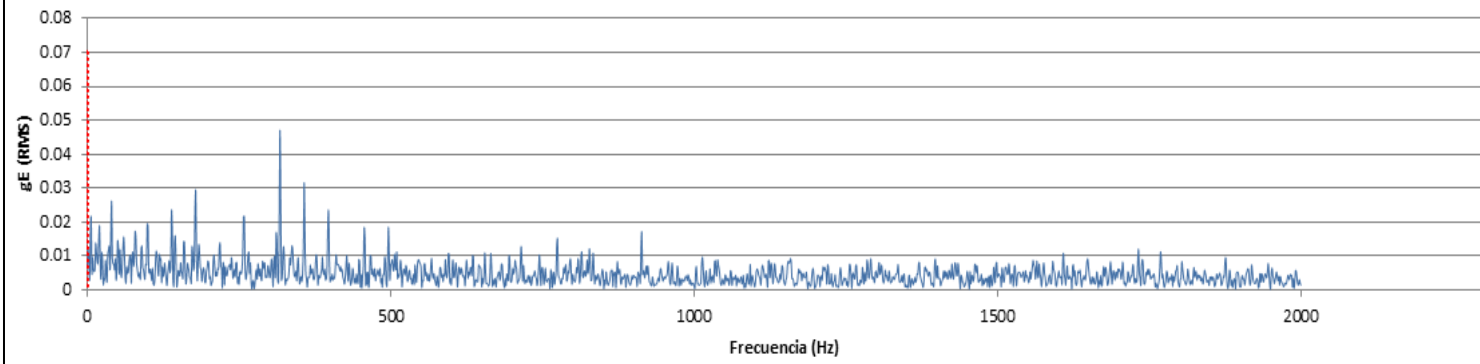
R3119 IN BOARD - 23/09/2015



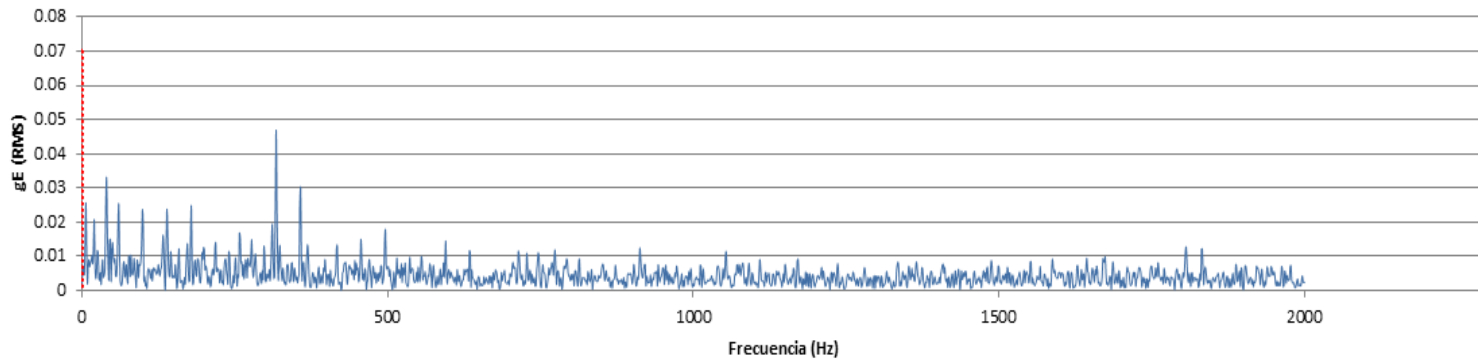
R3119 IN BOARD - 24/09/2015



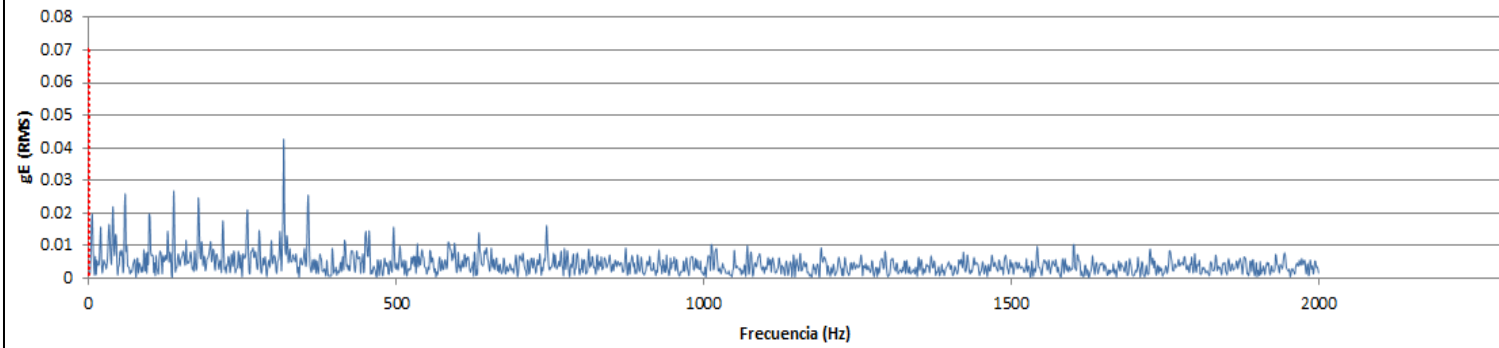
R3119 IN BOARD - 25/09/2015




R3119 IN BOARD - 28/09/2015



R3119 IN BOARD - 29/09/2015

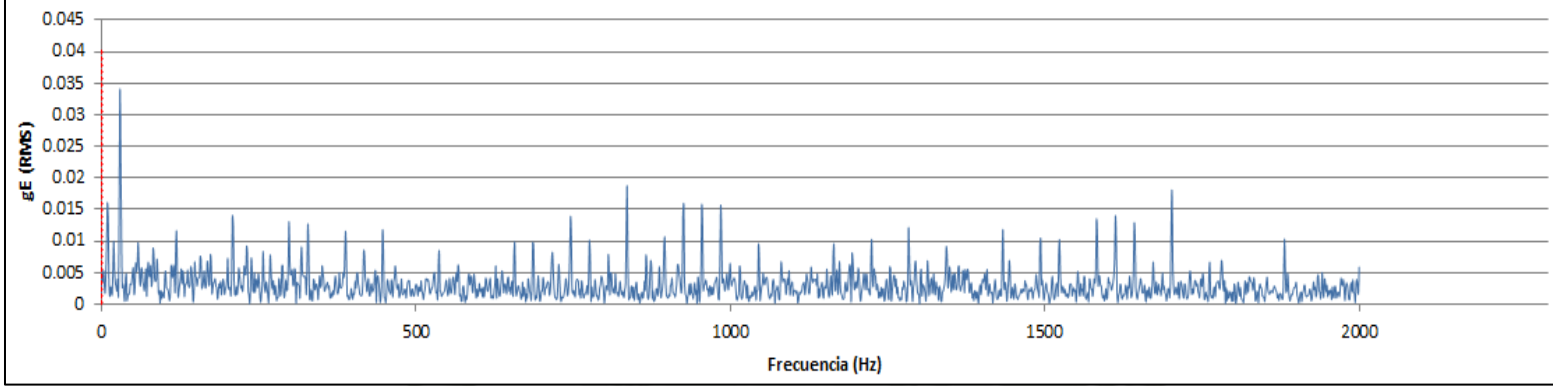




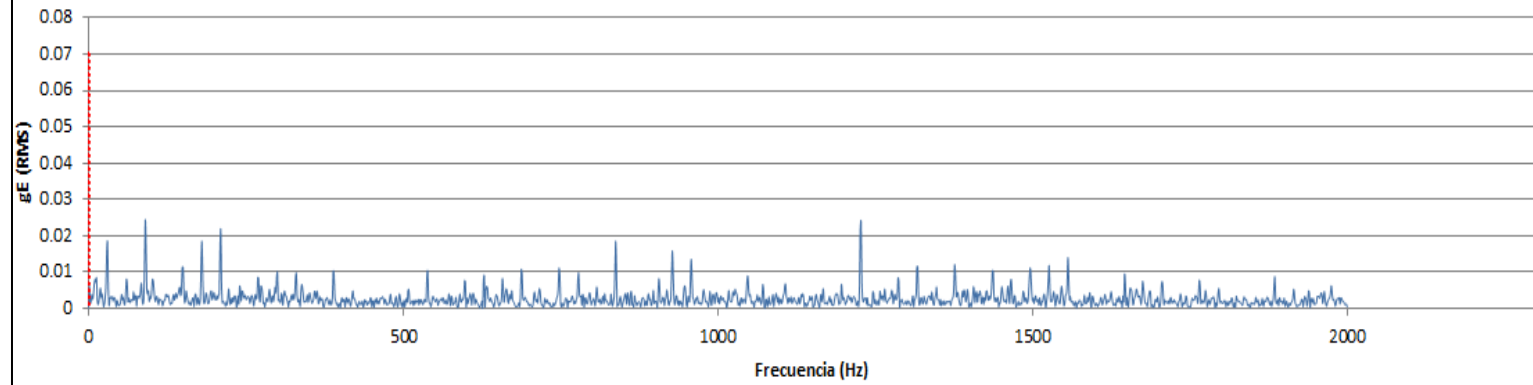
ANEXO XXII – ESPECTROS MOTOR R3119 OUT BOARD

ANEXO 22 – ESPECTROS MOTOR R3119 OUT BOARD

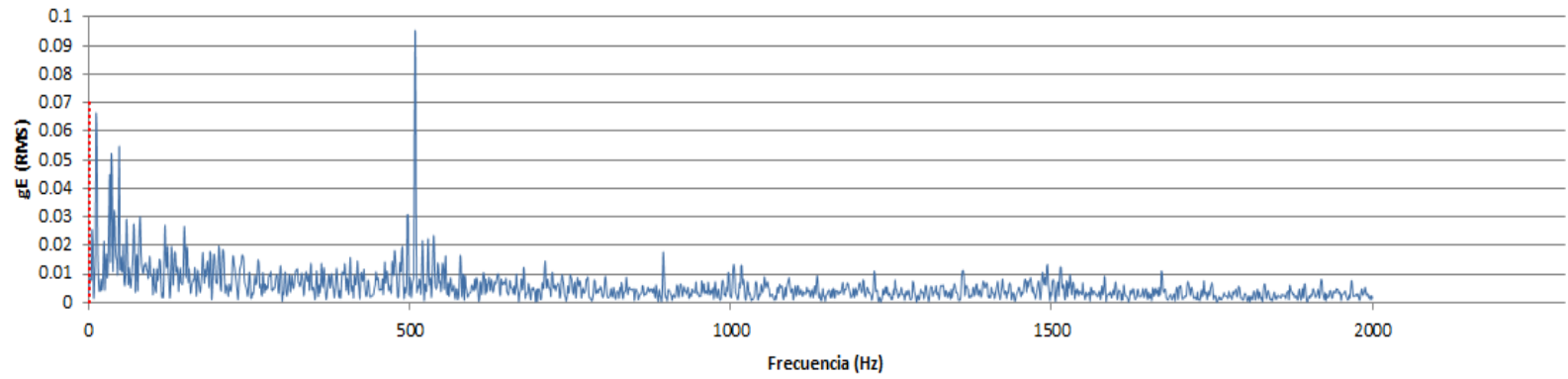
R3119 OUT BOARD - 12/09/2015



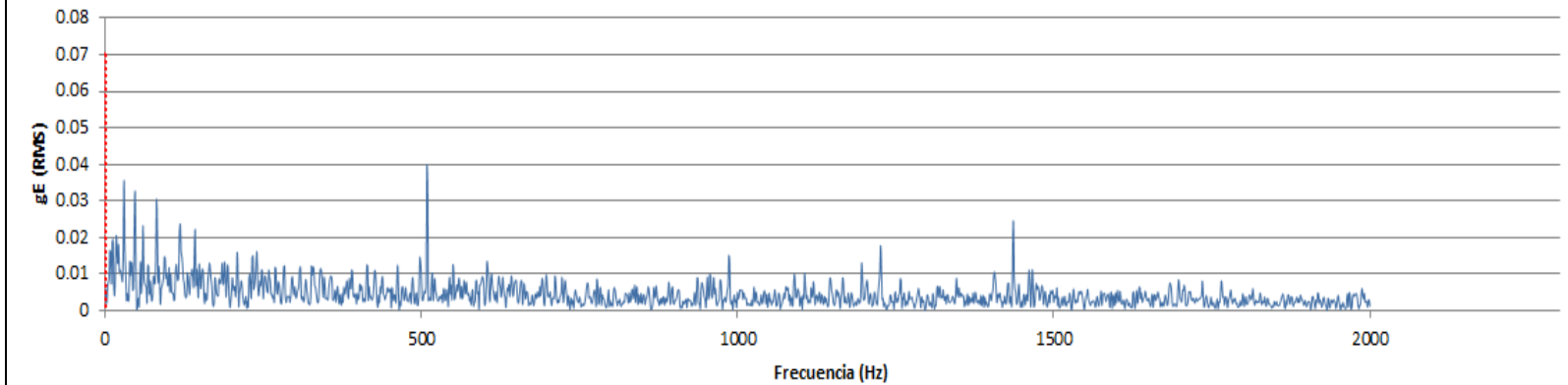
R3119 OUT BOARD - 13/09/2015



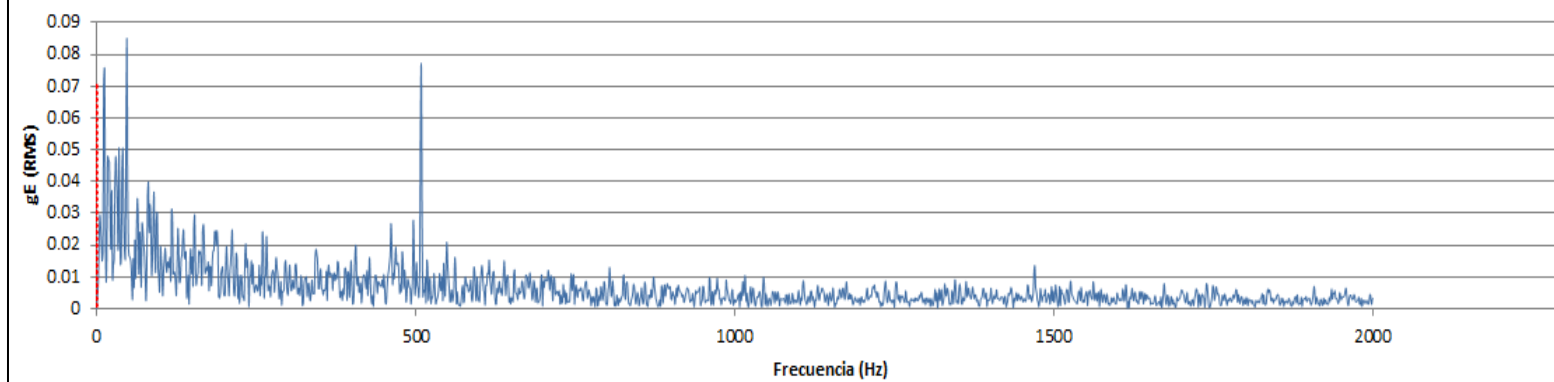
R3119 OUT BOARD - 14/09/2015



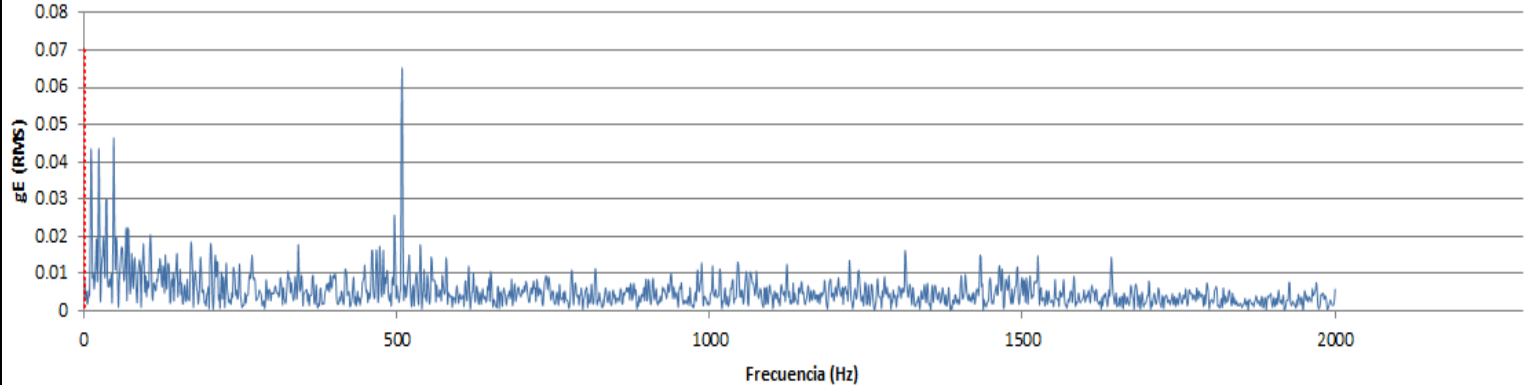
R3119 OUT BOARD - 15/09/2015



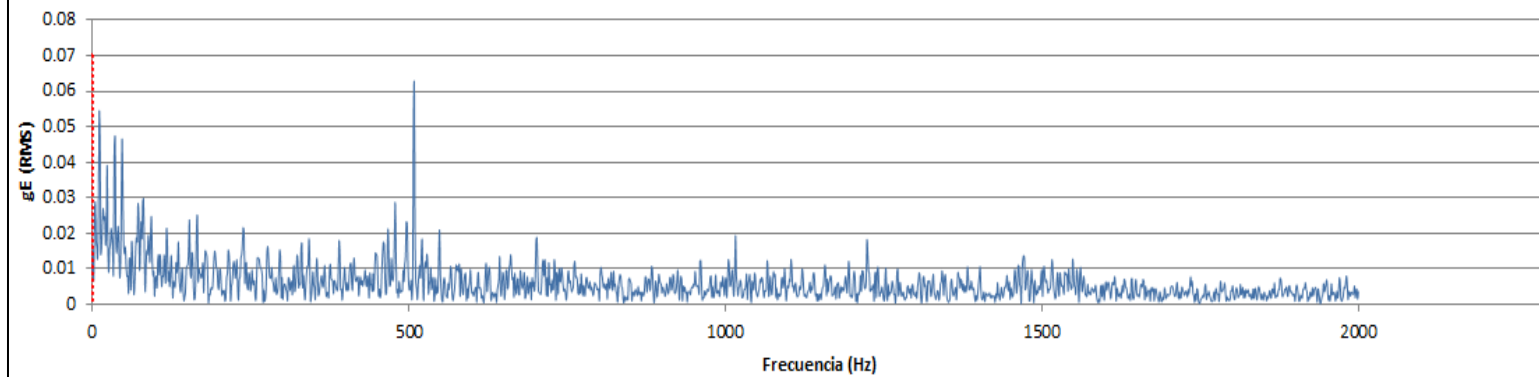
R3119 OUT BOARD - 16/09/2015



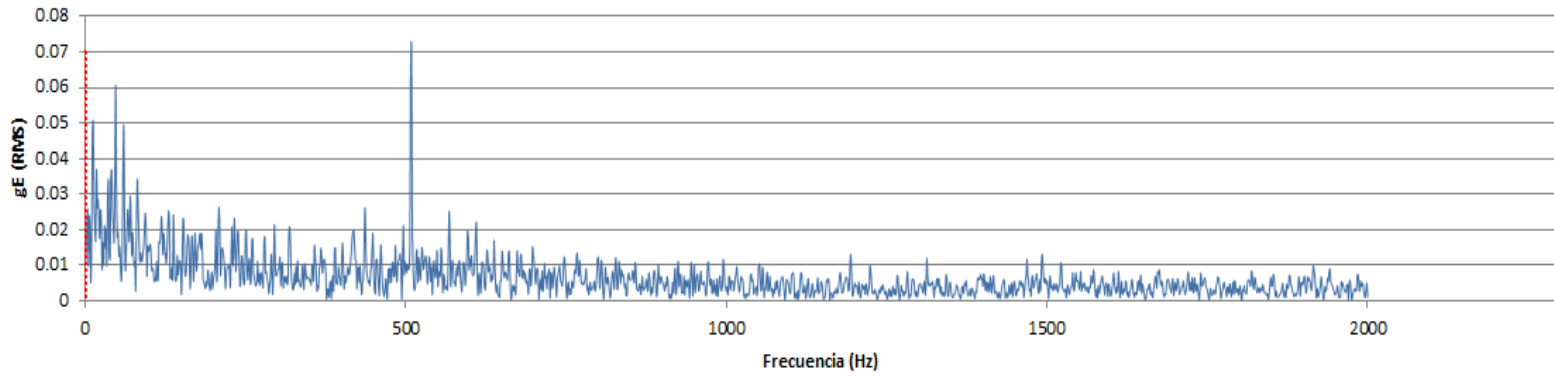
R3119 OUT BOARD - 17/09/2015



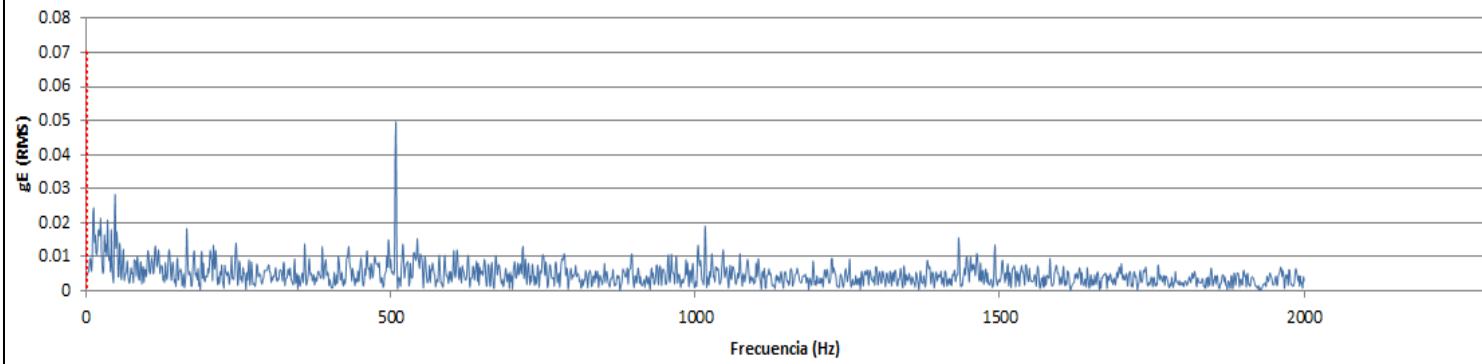
R3119 OUT BOARD - 18/09/2015



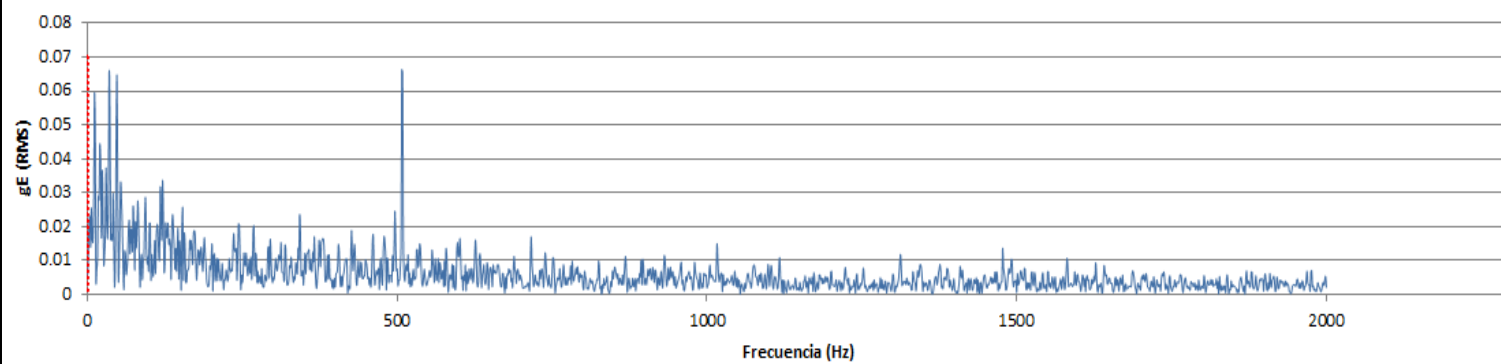
R3119 OUT BOARD - 19/09/2015



R3119 OUT BOARD - 21/09/2015



R3119 OUT BOARD - 22/09/2015



R3119 OUT BOARD - 23/09/2015

